

Aus dem Institut für Pflanzenernährung
der Justus Liebig-Universität Gießen
Direktor: Professor Dr. phil. H. Linser

**Das Verhalten einiger anorganischer und organischer
Eisenverbindungen im Boden und ihre Wirkungen
auf Eisenaufnahme, Ertrag und Proteinsynthese von
Pflanzen in Wasserkulturen**

Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades
bei der Landwirtschaftlichen Fakultät
der Justus Liebig-Universität Gießen

Eingereicht von

Diplom-Landwirt

Moawad Abdallah Moawad

geb. in Assuan/Ägypten

Gießen 1968

1969

Digitized by the Internet Archive
in 2026

Aus dem Institut für Pflanzenernährung
der Justus Liebig-Universität Gießen
Direktor: Professor Dr. phil. H. Linser

**Das Verhalten einiger anorganischer und organischer
Eisenverbindungen im Boden und ihre Wirkungen
auf Eisenaufnahme, Ertrag und Proteinsynthese von
Pflanzen in Wasserkulturen**

Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades
bei der Landwirtschaftlichen Fakultät
der Justus Liebig-Universität Gießen

Eingereicht von

Diplom-Landwirt

Moawad Abdallah Moawad

geb. in Assuan/Ägypten

Gießen 1968

Das Verhalten einiger anorganischer und organischer
Eisenverbindungen im Boden und ihre Wirkungen
auf Eisenaufnahme, Ertrag und Proteinanalyse von
Pflanzen in Wasserlösungen

Das Verhalten einiger anorganischer und organischer
Eisenverbindungen im Boden und ihre Wirkungen
auf Eisenaufnahme, Ertrag und Proteinanalyse von
Pflanzen in Wasserlösungen

Eisenverbindungen

Das Verhalten einiger anorganischer und organischer
Eisenverbindungen im Boden und ihre Wirkungen
auf Eisenaufnahme, Ertrag und Proteinanalyse von
Pflanzen in Wasserlösungen



Eisenverbindungen

Eisenverbindungen

Eisenverbindungen

Eisenverbindungen

Eisenverbindungen

Dekan: Professor Dr. P. Meinberg

1. Berichterstatte: Professor Dr. H. Linser
2. Berichterstatte: Professor Dr. N. Atanasiu

Tag der mündlichen Prüfung: 2. Februar 1969

Inhaltsverzeichnis

	Seite
A. Einleitung	6
B. Erster Hauptteil - Über das Verhalten des Eisens im Boden	9
I. Problemstellung	9
II. Literaturüberblick	10
1. Die Bedeutung der organischen Substanz im Boden	10
2. Die Eisendüngemittel	11
a. Anorganische Eisendüngemittel	11
b. Organische Eisendüngemittel	11
3. Wichtige Eigenschaften der Chelatverbindungen	12
4. Faktoren, die die Eisenformen und die Eisendüngung im Boden beeinflussen	13
4.1. Bodenazidität	14
4.2. Der Kalkgehalt des Bodens	15
4.3. Belüftung und CO_2/O_2 -Relation	18
4.4. Bodenfeuchtigkeit	18
4.5. Bodentemperatur	19
4.6. Die Wirkung anderer Ionen	19
4.7. Boden-Mikroorganismen	20
4.8. Die Wirkung des Tageslichtes auf die Chelatverbindungen	21
5. Die Umwandlung des Eisens im Boden	21
III. Eigene Untersuchungen	23
1. Auswaschungsversuch	23
1.1. Material und Methodik	24
1.2. Die Ergebnisse der Sickerwasser-Untersuchung	27
1.3. Diskussion über die Auswaschung	34
1.4. Die Untersuchung der Säulen	34
1.5. Material und Methodik	37
1.6. Ergebnisse der Bodenuntersuchungen	37
1.7. Diskussion der Bodenuntersuchungen	43
1.8. Zusammenfassender Überblick der Ergebnisse des Auswaschungsversuches	44
2. Mineralisierungsversuch	46

	Seite
2.1. Versuchsdurchführung	48
2.2. Diskussion der Versuchsergebnisse	49
C. Zweiter Hauptteil - Über die Rolle des Eisens als Pflanzennährstoff	61
C.A. Der Einfluß des Eisens auf Wachstum und Entwicklung der Pflanzen	61
I. Literaturüberblick	61
1. Faktoren, die die Eisenversorgung der Pflanzen beeinflussen	61
1.1. Äußere Faktoren	61
a. Temperatur	61
b. Tageslicht	62
1.2. Faktoren, die sich aus dem Nährmedium ergeben	62
a. pH-Wert des Nährmediums	63
b. Einfluß des Mangans	64
c. Einfluß des Phosphors	66
d. Das Zusammenwirken verschiedener Ionen	67
1.3. Andere Faktoren	69
2. Einfluß der Eisenmangelchlorose auf das Pflanzenwachstum	70
2.1. Einfluß auf die Relation aktives Fe/ inaktives Fe	70
2.2. Einfluß auf die Chlorophyll-Synthese	71
2.3. Einfluß auf die Enzym-Aktivität	72
2.4. Einfluß auf die Protein-Synthese	72
2.5. Einfluß auf die Kohlenhydrat-Synthese	73
3. Verfahren zur Heilung der Eisenchlorose	74
4. Bedeutung der Chelatverbindungen in der Eisenernährung	79
II. Eigene Untersuchungen	86
II.I. Vegetationsperiode 1965	88
1. Erster Versuch	88
1.1. Versuchsbeobachtungen	88
1.2. Versuchsergebnisse	89

	Seite
1.3. Die Methodik der Eisenbestimmung	90
2. Zweiter Versuch	94
2.1. Versuchsbeobachtungen	95
2.2. Versuchsergebnisse	96
3. Dritter Versuch	109
3.1. Versuchsbeobachtungen	110
3.2. Versuchsergebnisse	110
II.II. Vegetationsperiode 1966	127
1. Erster Versuch	127
1.1. Versuchsbeobachtungen	128
1.2. Versuchsergebnisse	128
2. Zweiter Versuch	141
2.1. Versuchsbeobachtungen	142
2.2. Versuchsergebnisse	142
III. Diskussion der Wasserkulturversuche	157
C.B. Zusammenhänge in der Eisenaufnahme und im Eisen- transport in der Pflanze	169
I. Literaturüberblick	169
1. Der Eisentransport in der Pflanze	170
2. Verschiedene Theorien für die Aufnahme von Eisenchelatverbindungen	172
II. Eigene Untersuchungen	175
1. Methodik	175
2. Versuchsergebnisse	177
3. Diskussion	180
C.C. Der Einfluß des Eisens auf den Proteinstoffwechsel in der Pflanze	181
I. Literaturüberblick	182
II. Eigene Untersuchungen	184
1. Untersuchungsmethoden	185
2. Versuchsergebnisse	191
3. Diskussion der Untersuchungen des Proteinstoffwechsels	194
D. Zusammenfassung	211
E. Literaturverzeichnis	220

A Einleitung

Seit den grundlegenden Arbeiten LIEBIGS, dem Begründer der Pflanzenernährungslehre weiß man, daß beim Aufbau des Pflanzenkörpers neben den bei der Verbrennung von Pflanzenmasse flüchtigen Elementen eine ganze Reihe von Mineralstoffen von Bedeutung sind, die sich nach der Verbrennung in der Asche vorfinden. Einer dieser unentbehrlichen Mineralbestandteile für alle Grönpflanzen ist das Eisen.

In vielen modernen Darstellungen wird das Eisen nicht zu den Spurenelementen bzw. den Mikronährstoffen, sondern zu den Kernnährstoffen bzw. den klassischen biogenen Elementen (Makronährstoffe) gerechnet. Andererseits ordnen zahlreiche Autoren das Eisen den Spurenelementen zu aus folgenden Gründen:

1. Das Eisen kommt in den Pflanzenorganen vielfach in ähnlich geringen Konzentrationen vor wie die übrigen Spurenelemente.
2. Das Eisen wird wegen seines hohen Wirkungswertes in den Organismen, wie die anderen Spurenelemente als Hochleistungselement betrachtet.
3. Das Eisen erfüllt in den Organismen ähnliche biologische Funktionen wie die anderen Spurenelemente.

Das Grün der Wälder und Felder könnte ohne Mitwirkung des Eisens nicht zustande kommen, obwohl das Blattgrün (Chlorophyll) bekanntlich eisenfrei ist. Die Bedeutung des Eisens beschränkt sich aber nicht in seiner Mitwirkung bei der Chlorophyll-Bildung, sondern dieses Element beteiligt sich darüber hinaus in vielen wichtigen Lebensfunktionen der Pflanze.

Das Eisen ist ein Bestandteil der Eiweißkörper und Cytochrome in den Chlorophyllkörnern (nicht aber das Chlorophyllmolekül). Die Cytochrome (Farbstoffe) bestehen aus Eisen-Porphyrin-Eiweißverbindungen. Sie ermöglichen zusammen mit dem ebenfalls eisenhaltigen Warburg'schen Atmungsferment die Oxydation von Kohlenhydraten, Fetten, Eiweißstoffen usw. durch den Luftsauerstoff, wobei Energie frei wird, die das ganze Lebensgetriebe der Pflanzen unterhält.

Das Eisen ist ebenso ein Bestandteil der Peroxydasen (Eisenpro-

teide mit prosthetischen Gruppen aus eisenhaltigem Protoporphyrin) und der Katalase, die das giftige Wasserstoffperoxyd, das bei den Atmungs- und Assimilationsprozessen entsteht, schnell in harmlosen Wasser und Sauerstoff zerlegt.

Die Unentbehrlichkeit des Eisens für das Pflanzenwachstum äußert sich bei seinem Mangel in Form der "Eisenchlorose", die auf Störungen des Eisenhaushaltes der Pflanzen beruht und an manchen Pflanzenarten unter bestimmten Boden- und Witterungsbedingungen in großem Ausmaß auftreten kann. Eine lang anhaltende Eisenchlorose beeinträchtigt die Pflanzenerträge.

Die zahlreichen Faktoren, welche das Auftreten dieser Krankheit beeinflussen, sind noch nicht genügend erforscht. Die praktische Bekämpfung der Eisenchlorose, die hauptsächlich in der Normalisierung des Gehaltes des Bodens an verfügbarem bzw. aufnehmbarem Eisen besteht, war lange Zeit unter den Bedingungen der Praxis schwer möglich. Die in den USA vor einigen Jahren entwickelten organischen Eisenkomplexverbindungen, die sogenannten "Eisenchelat-Verbindungen", werden heute wegen ihrer auch unter extremen Bodenbedingungen guten Löslichkeit mit Erfolg zur Eisenversorgung der Pflanzen verwendet. Obwohl durch Spritzung mit eisenhaltigen Lösungen die Eisenchlorose an manchen Obstbäumen behoben werden konnte, bevorzugen die meisten Autoren ihre Heilung bei anderen Kulturpflanzen durch Zufuhr von Eisendüngemitteln zum Boden wegen der vielseitigen Bedeutung auf den Bodenzustand und seine mannigfaltige Wirkung im Hinblick auf chemisch-physikalische Vorgänge im Boden.

Die vorliegende Arbeit besteht aus zwei Hauptteilen, und es soll ihre Aufgabe sein, die folgenden Zusammenhänge in der Eisenernährung näher zu untersuchen:

Der erste Hauptteil beschäftigt sich mit dem Verhalten des Eisens im Boden, seiner Auswaschung bzw. Verlagerung sowie mit der Festlegung bzw. Mineralisierung verschiedener Eisendüngemittel (anorganisch und organisch) in verschiedenen Böden.

Der zweite Hauptteil behandelt die Rolle des Eisens als Pflanzennährstoff. Hierzu wurden folgende Untersuchungen vorgenommen:

- a) Fünf Wasserkulturversuche in zwei Vegetationsperioden zur Verfolgung des Einflusses verschiedener Eisenformen auf den Ertrag und Eisengehalt von Maispflanzen.
- b) Ein Wasserkulturversuch mit verschiedenen Eisenformen zur Frage der Absorption des Eisens an den Wurzeln, sowie Translokation und Akkumulation des aufgenommenen Eisens durch junge Sonnenblumenpflanzen.
- c) Ein Wasserkulturversuch zur Aufklärung einiger Zusammenhänge zwischen der Eisenernährung und dem Proteinstoffwechsel in Maispflanzen.

B Das Verhalten des Eisens im Boden

I Problemstellung

Wenn man den Boden als natürliches Wachstumsmedium der Pflanzen betrachtet, muß sein heterogenes System berücksichtigt werden. Der Boden besteht aus drei Komponenten:

1. Der festen Phase (anorganische und organische Partikel); sie dient als Nährstoffquelle.
2. Der flüssigen Phase (die Bodenlösung); sie hat die Funktion eines Mobilisationsmittels der Bodennährstoffe, und sie ist das Medium, in dem sich die meisten chemisch-physikalischen und biologischen Prozesse abspielen.
3. Der gasförmigen Phase (Bodenluft); sie dient als Quelle für die erforderlichen Gase sowie den Abtransport von Kohlendioxid.

Diese drei Komponenten bilden im Boden durch ihr Zusammenwirken ein Milieu, worin sich die Nährstoffe befinden, die das Wachstum der Pflanzen völlig beeinflussen.

Von diesen Nährstoffen hat sich das Eisen als unentbehrliches Element erwiesen. Im allgemeinen enthalten die meisten Böden genügend pflanzenverfügbares Eisen, um die Pflanzen damit ausreichend zu versorgen (CLAUSER und JENNY 1960). Aber in vielen Fällen bilden sich aus den drei genannten Komponenten in verschiedenen Böden Faktoren heraus, die die erforderliche Konzentration an aufnehmbarem Eisen im Boden verändern und seine richtige Ausnutzung verhindern.

Es hat sich gezeigt, daß man solche Faktoren nicht nach einzelnen der drei genannten Komponenten klassifizieren kann, sondern meistens wird die Aufnehmbarkeit des Eisens durch die Wechselbeziehungen dieser Faktoren verhindert, die zu mehr als einer Komponenten, oder vielleicht zu allen drei Komponenten gehören.

Als Endeffekt befindet sich das Eisen dadurch im Boden in unverfügbaren Formen, die nach Änderung der Bodenbeschaffenheit und durch die Anwendung von geeigneten Düngemitteln wieder zu aufnehmbaren Verbindungen umgesetzt werden können.

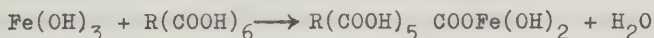
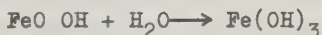
Zahlreiche Autoren untersuchten die Wechselwirkungen zwischen

solchen ungeeigneten Bedingungen verschiedener Bodenarten und verschiedenen Eisendüngemitteln, die die Eisenversorgung der Pflanze durch aufnehmbare Eisenformen ermöglichen sollen.

II Literaturüberblick

1. Die Bedeutung der organischen Substanz im Boden.

Voraussetzung für die Wirksamkeit des Eisens im Boden ist das Vorhandensein in löslicher Form. Durch die natürlichen chelat-ähnlichen Verbindungen im Boden wie Citrat, Tartrat, Malat und Laktat kann das Eisen in löslicher, aufnehmbarer Form gehalten werden (WALLACE 1957). Darüber hinaus bildet das Eisen mit dem organischen Material des Bodens Komplexe, von denen die des Eisen(III) stabiler, löslicher und leichter beweglich sind als die des Eisen(II) (ATKINSON 1957). Auch SCHNITZER und SKINNER (1963) haben die Bedeutung der organischen Substanz im Boden für die Löslichkeit des Eisens untersucht. Sie sind der Meinung, daß die Komplexe, die aus organischen Verbindungen und Eisen im Verhältnis 1:1 (in Mol) bestehen, die höchste Aufnehmbarkeit und Wasserlöslichkeit besitzen. Die Reaktion kann durch die Gleichung dargestellt werden:



R= organisches Molekül

Bei der Auswaschung solcher Komplexe entstehen neue Komplexverbindungen, bei denen die Eisenmoleküle die organischen Moleküle überwiegen. Solche Komplexe sind weniger aufnehmbar und weniger wasserlöslich.

Zu den wichtigsten organischen Verbindungen des Bodens zählen COULSON und Mitarbeiter (1960) die Polyphenole. Sie sollen vorwiegend bei der Zersetzung niederer Pflanzen und grüner pflanzlicher Teile im Boden entstehen. Durch solche Polyphenole wird das Eisen in einer organischen Eisen(II)-Polyphenol-Komplex-Form ausgewaschen, speziell in sauren Böden.

2. Die Eisendüngemittel.

Häufig tritt bei verschiedenen Arten von Kulturpflanzen, die auf bestimmten Böden wachsen, die sogenannte "Eisenchlorose" auf. Die Bekämpfung dieser Eisenmangelchlorose durch geeignete Düngemittel hat sich als ein schwieriges Problem der Pflanzenernährung bzw. Pflanzenproduktion erwiesen. Auch die chemische Industrie hat sich aus wirtschaftlichem Interesse mit diesen Fragen beschäftigt. So kommt es, daß eine Reihe von Düngemitteln zur Bekämpfung der Eisenchlorose vorliegt.

a) Anorganische Eisendüngemittel.

Die Anwendung solcher Verbindungen, wie z.B. Eisenchlorid oder Eisen(II)sulfat, hat keinen großen Erfolg gebracht; meistens erwies sich eine Bodendüngung mit anorganischen Eisensalzen als zwecklos. Hierbei werden die in Lösung befindlichen Eisenionen im Boden sofort festgelegt und finden sich im Endeffekt in unlöslicher Hydroxyd- oder Phosphatform vor (STEWART und LEONARD 1952).

b) Organische Eisendüngemittel.

Die frühen Erkenntnisse über den Wert der Düngung für das Pflanzenwachstum und über die Zusammenhänge zwischen Humus und Bodenfruchtbarkeit lenkten auch im Zusammenhang mit der Eisenfrage die Aufmerksamkeit auf die organischen Stoffe des Bodens (SCHATZ 1955). Die Tatsache des Vorhandenseins natürlich vorkommender chelatartiger Eisenverbindungen im Boden, die das Eisen in pflanzenverfügbarer Form enthalten, regte das Interesse an, ähnliche Verbindungen zu synthetisieren. Heute wird den synthetischen Chelatverbindungen als Quelle für die Eisenversorgung der Pflanze eine wachsende Bedeutung beigemessen. Neben der Bedeutung der natürlich vorkommenden chelatartigen Verbindungen des Bodens für das Pflanzenwachstum ist aber auch ihr Einfluß auf die Bodenbildung zu beachten. Tatsächlich scheint es, als müßten sie neben den schon lange bekannten Vorgängen der Oxydation, Hydratation, Carbonisierung, Lösung und Fällung, als ein wesentlicher Faktor der biologischen Verwitterung betrachtet werden.

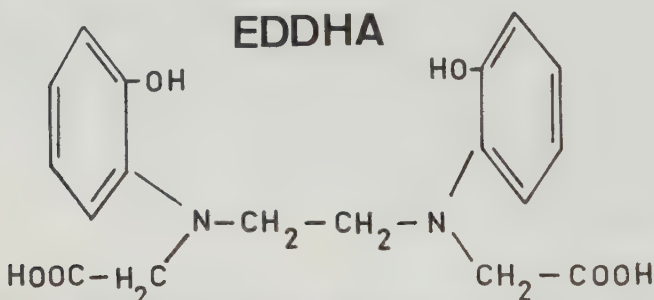
3. Wichtige Eigenschaften der Chelatverbindungen.

Unter Chelatbindung versteht man einen charakteristischen Bindungsmechanismus zwischen einem metallischen Kation und einem organischen Molekül. Als Kationen werden hierbei vorwiegend Schwermetalle gebunden. Die organische Struktur wird als Chelatbildner oder Chelator bezeichnet. Sie bildet mit dem Metall das sogenannte "Metallchelate". Sein wesentliches Merkmal ist, daß sich der Chelator mit mindestens zwei Stellen an das Metall anlagert. Hierbei biegt er sich gleichsam um das Kation herum, um sich mit mehreren Stellen binden zu können (MARTELL und CALVIN 1957, LEHMANN 1963). Es bilden sich eine oder mehrere Ringstrukturen, die das gesamte Molekül ausrichten und stabilisieren. Die große Neigung des Eisens, Chelatkomplexe einzugehen (WEINSTEIN und Mitarbeiter 1954) und seine Fähigkeit zum Valenzwechsel ($\text{Fe}^{2+} \leftrightarrow \text{Fe}^{3+}$), sind zwei wichtige Charakteristika, auf denen seine Wirkung in der Chelatform beruht.

Eisenchelate haben sich zur Bekämpfung der Eisenchlorose bewährt. Nach SCHATZ (1955) zeichnen sich die Chelatkomponenten dadurch aus, daß sie selbst den Pflanzen keine Nährstoffe unmittelbar zuführen. Sie sind auch kein Bodenverbesserungsmittel im eigentlichen Sinne. Ihr Wert liegt vielmehr in ihrer Fähigkeit, die für gewöhnlich unlöslichen anorganischen Salze des Eisens in einer dauerhaft löslichen, von den Pflanzen leicht aufnehmbaren Form zu halten. Während bei der Düngung mit anorganischen Salzen besonders auf kalkreichen und alkalischen Böden das Eisen dazu neigt, als unlösliches Phosphat oder Hydroxyd auszufallen, wird es als löslicher, organischer Koordinationskomplexe, eben als Chelat, so in Lösung gehalten, daß es dem Nährstoffbedürfnis der Pflanzen genügt.

Hierbei ist jedoch zu beachten, daß die Stabilität der Chelate genügend groß sein muß. Je höher die Stabilitätskonstante, desto niedriger ist der Dissoziationsgrad und umso schwieriger die Trennung des Metallions aus dem Komplex. HILL-COTTINGHAM (1957) sowie WEINSTEIN und Mitarbeiter (1954) meinen, daß die Stabilitätskonstante der Eisen(III)-Chelate größer als bei allen anderen Metallen ist, die als essentielle Metalle für die Ernährung

der höheren Pflanzen bekannt sind. Nach KROLL (1957) hängt die Instabilität der Eisenchelate im alkalischen Bereich vom Verhältnis zwischen der chemischen Struktur des Chelates und von der Wertigkeit des Eisens ab. Unter instabilen Verhältnissen können Umwandlungen des Chelatmoleküls eintreten, indem z.B. Carboxylgruppen am EDTA-Molekül durch Phenolgruppen ersetzt werden. Als Beispiel dafür ist die Verbindung EDDHA (Äthylendiamindi-o-hydroxyphenyllessigsäure) genannt.



Darüber hinaus beeinflussen andere Faktoren, wie Ringzahl der Metallchelate, Umfang, Größe und Ausmaß des Ringes, sowie die Natur der Donoratome die Stabilität solcher Verbindungen (LEHMANN 1963). Nach MARTELL (1957) führt die Hydrolyse der zweiwertigen Metallchelate zur Ausfällung neutraler Hydroxyde. Die Hydrolyse der mehrwertigen Metallchelate, wie der Eisen(III)-Chelate, führen zur Entstehung von Monohydroxo-Verbindungen und einer großen Zahl an hydrolytischen Zwischenprodukten.

4. Faktoren, die die Eisenform und die Eisendüngung im Boden beeinflussen.

In vielen Fällen hat die Anwendung von Eisendüngemitteln über den Boden nicht die erwünschten Ergebnisse zur Heilung der Eisenchlorose gezeigt. Solche Mißerfolge werden durch den Einfluß verschiedener ungeeigneter Bodenbedingungen verursacht. Zahlreiche Autoren haben sich mit diesem Problem befaßt, und

verschiedene Faktoren wurden als Ursache für eine ungenügende Wirkung der Eisendüngung erkannt:

4.1. Bodenazidität:

Häufig findet man den Eisenmangel auf Bodenflächen ungleichmäßig verteilt. BRANDENBURG (1963) fand ihn auf saurem Hochmoor extrem stark an Weg- und Grabenrändern und auf "sauren" Stellen oder an sogenannten "Wasserlöchern". Hier ist sein Auftreten so typisch, daß man ihn bislang für "Säureschäden" hielt. Als Ursache vermutete man die schädliche Wirkung ungebundener Humussäuren bzw. überschüssiger H-Ionen. Der Eisenmangel auf sauren Hochmoorböden ist in einem Reaktionsbereich von etwa 3,5 (manchmal niedriger) an diese hohe Azidität gebunden. Dadurch erklärt es sich, daß er vor allem auf fehlerhaft kultivierten Flächen, auf unzweckmäßig gedüngten und unzureichend gekalkten Hochmoorfeldern und als Folge unregelmäßiger Wasserverhältnisse auftritt. In den letzten Jahren konnte der Beweis erbracht werden, daß als Ursache dieser sogenannten "Säureschäden" nicht die Wasserstoffionen als solche, sondern eine durch sie bedingte verminderte Verfügbarkeit des Eisens angesehen werden muß. Infolgedessen wird sich in solchen Fällen wenig oder gar kein austauschbares pflanzennutzbare Eisen(III) im Boden befinden (THOMAS und COLEMAN 1964). Die beiden Autoren haben ihre Meinung auf Grund der Extraktion verschiedener Säureböden gebildet, wobei sie als Extraktionsmittel heißes destilliertes Wasser, NaCl und CaCl_2 benutzten. Weiterhin kann bei der verminderten Verfügbarkeit die Ladung der Eisenformen in sauren Böden eine Rolle spielen. Die Untersuchungen von WALLACE (1963) haben gezeigt, daß 12% des beweglichen Eisens auf einem sauren Boden in der Anionen-Form vorlagen. Ebenfalls enthielt ein alkalischer Boden 24% der beweglichen Eisenformen in der Anionen-Form. Die Wirkung solcher Zustände zur Entstehung des Eisenmangels ist bis jetzt nicht geklärt worden. Häufig ist bei dem Gesamtkomplex der "Säureschäden" auf Hochmoorböden als zweite Komponente der Molybdänmangel zu berücksichtigen. Nach den Untersuchungen von BRANDENBURG (1963) tritt der Mo-Mangel auf diesem Bodentyp unterhalb einer Reaktion von etwa pH 4,2 auf. Während er

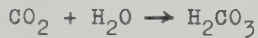
im stark sauren Bereich von etwa pH 2,8-3,5 von den auffälligen Symptomen des Eisenmangels überdeckt wird, findet man den Mo-Mangel bei Bodenreaktionen zwischen etwa 3,4-4,2 pH in reiner Form vor. Nach BRANDENBURG (1963) besteht die praktische Bekämpfung der "Säureschäden" vor allem in einer Normalisierung des Kalk- und Wasserhaushaltes des Bodens. Durch eine Kalkung, die die Reaktion über den Schwellwert von etwa pH (KCl) 3,8 hebt, wird der Eisenmangel auf längere Sicht und in wirtschaftlicher Weise behoben.

BOULD (1955) bezeichnet die Chelatverbindungen Fe^{3+} -Dicalcium-EDTA und Fe^{3+} -Dinatrium-EDTA als sehr geeignete Mittel zur Heilung der Eisenchlorose in sauren Böden. Die Zugabe von 10-20 g einer der beiden Verbindungen reicht aus, um die Erscheinungen des Eisenmangels bei einem Obstbaum zu beseitigen. WEINSTEIN und Mitarbeiter (1954) haben Fe-EDTA ebenfalls mit Erfolg in solchen sauren Böden angewendet. Auch BRANDENBURG (1963) hat Eisenchelateverbindungen (Fe-EDTA) für diesen Zweck benutzt. Für die erfolgreiche Bekämpfung waren in den durchgeführten Versuchen je nach der Stärke des Mangels 50-200 kg/ha Eisenchelate und 4-6 kg/ha Natriummolybdat ($\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) notwendig. Zur großflächigen Bekämpfung der "Säureschäden" erwies sich deshalb der praktische Einsatz des Eisenchelates aus Kostengründen nicht als wirtschaftlich.

4.2. Der Kalkgehalt des Bodens.

Besonders kritisch ist die Eisenversorgung auf karbonathaltigen Böden. Der pH-Wert dieser Böden ist so hoch, daß das Eisen ausschließlich in schwerlöslicher Form vorliegt. Es kommt zum Eisenmangel. ILJIN (1951), BROWN (1953), HOLMES und BROWN (1955), LINDSAY und THORNE (1954) sowie PORTER und THORNE (1955) haben den Einfluß der Karbonate auf die Eisenverfügbarkeit untersucht. Die beiden letztgenannten Autoren sammelten Bodenproben von Stellen, wo die Pflanzen Symptome von Eisenchlorose zeigten, und von Stellen, wo das Pflanzenwachstum normal war. Die Bodenproben wurden zwei Tage lang unter 15 Atmosphären Druck gesetzt. Die Bodenlösungen wurden durch eine Druckmembran aus Zellophan unterhalb einer löslichen Paraffinschicht gesammelt. In den Bodenlösungen wurde HCO_3^- in Form von CO_2 volumetrisch bestimmt.

Die Eisenmangel-Bodenproben enthielten hohe Konzentrationen an HCO_3^- und Ca^{2+} . In solchen kalkreichen Böden steigt der CO_2 -Druck, speziell bei schlechter Bodenbelüftung und hoher Feuchtigkeit. Unter solchen Bedingungen entsteht die Kalkchlorose.



WALLIHAN und Mitarbeiter (1962) weisen auf die schädliche Wirkung des hohen pH-Wertes hinsichtlich der Löslichkeit der Fe- und Mn-Salze in kalkreichen Böden hin. Die Autoren behaupten, daß die feste Phase der Karbonate dabei eine Rolle spielen soll.

Auch BRANDENBURG (1963) betrachtet den hohen Kalkgehalt verschiedener Böden als Ursache der Eisenfestlegung und Kalkchlorose. Die Experimente von CLAUSER und JENNY (1960) zeigten, daß die Bodenlösungen kalkreicher Böden nicht ausreichend lösliches Eisen enthielten, wie es zum gesunden Wachstum von Alfalfa-Pflanzen (*Medicago sativa*) notwendig ist. Trotzdem kann die Löslichkeitstheorie der Nährstoffe nicht alleingültig als Erklärung für die ungenügende Eisenaufnahme in alkalischen oder kalkreichen Böden angesehen werden. GRUNES und JENNY (1960) sind vielmehr der Meinung, daß die Eisenernährung in solchen Böden auch von der Zahl der Eisenhydroxyd- und Eisenoxyd-Partikel, die sich in der Wurzelzone befinden, abhängig ist.

Die praktische Bekämpfung der Kalkchlorose oder auch "Kalziose" besteht vor allem in einer Erhöhung des löslichen Eisengehaltes der kalkreichen Böden. LINDSAY und THORNE (1954) versuchten durch Zugabe von Schwefel oder Gips diesen Effekt zu erzielen. Nach dieser Behandlung wurde die Konzentration der Ca- und Mg-Ionen erhöht, die Konzentration von HCO_3^- aber verringert; trotzdem blieben die Eisenmangel-Erscheinungen die gleichen.

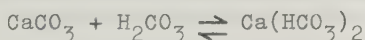
Auch in den Untersuchungen von CLAUSER und JENNY (1960) bewährten sich Eisenchelate zur Bekämpfung der "Kalkchlorose". Die starke "Kalziose" konnte durch die Zufuhr von Fe-EDTA schon bei pH-Werten unter oder um den Neutralpunkt, auch manchmal bei höheren pH-Werten, beseitigt werden. Bei den verschiedenen Applikationsmethoden muß die Konzentration bzw. die Höhe der Zugabe

genauer als bei den üblichen Mineraldüngemitteln beachtet werden, da eine überhöhte Zufuhr leicht zu Schädigungen führen kann, die sich in Nekrose-Symptomen äußern. Bei dem sonst so erfolgreichen Einsatz des Fe-Salzes der EDTA darf jedoch nicht übersehen werden, daß die Wirkung dieser Verbindung auf stark kalkhaltigen und zudem noch tonreichen Böden in der üblicherweise empfohlenen Menge nicht immer befriedigt. Hierbei ist jedoch bei der Bodendüngung zu beachten, daß die Stabilität der Chelate genügend groß ist. Denn der Dissoziationsgrad der EDTA-Verbindung nimmt bei Erhöhung des pH-Wertes über den Neutralpunkt hinaus zu (ATKINSON und WRIGHT 1957, DEKOCK 1955). Darüber hinaus spielt auch das Calcium bei der Anwendung von Chelatverbindungen in alkalischen Böden eine entscheidende Rolle. Die Untersuchungen von HILL-COTTINGHAM (1957) stellten die Auswirkung der Ca-Ionen in der Bodenlösung fest. In der Abwesenheit von Ca oder bei niedriger Konzentration der Ca-Ionen kann EDTA das Eisen auch bei hohen pH-Werten in löslicher, aufnehmbarer Form halten. Dagegen blockieren große Konzentrationen an löslichem, aufnehmbarem Calcium die Wirkung des Fe-EDTA zur Heilung der "Kalkchlorose" in kalkreichen Böden. Vielfach verdrängen - obwohl die Affinität des Ca^{++} zum EDTA kleiner ist als die von Fe-Ionen - die in hohen Mengen vorhandenen Ca-Ionen das Fe aus seinem Chelatkomplex, so daß das Fe-EDTA über die Bodendüngung nicht zur Wirkung kommt, auch nicht als Komponente von Mischdüngern. Infolge dessen entsteht bei höheren pH-Werten in kalkreichen Böden (pH 7,5-8,0) eine neue Verbindung von Fe-EDTA, bei der das Fe-Atom eine OH-Gruppe trägt. Die neue Verbindung, Hydroxy-Fe-EDTA, ist viel weniger stabil, als das Fe-EDTA selbst. Die Untersuchungen von HILL-COTTINGHAM und LLOYD (1958) bezeichnen die Fe-Komplexe der CDTA (Cyclohexan-1,2-diamin-tetraessigsäure) als geeignete Chelatverbindungen zur Heilung der "Eisenchlorose" in kalkreichen Böden. Hier zeigen sowohl EDDHA (Formel Seite 13) als auch CDTA eine höhere Stabilität, indem sie dem Austausch des Eisens gegen die Ca-Ionen des Bodens einen großen Widerstand entgegensetzen, und auch durch die Tonfraktion werden sie weniger stark festgelegt als das Fe-Komplexsalz der EDTA.

4.3. Belüftung und CO_2/O_2 -Relation.

Nach den Beobachtungen von WALLIHAN und Mitarbeitern (1962) sowie LINDSAY und THORNE (1954) führt die schlechte Belüftung und der niedrige Gehalt an Sauerstoff in sauren und kalkreichen Böden oft zur Eisenchlorose. Speziell bei hohem CaCO_3 -Gehalt wird die CO_2 -Konzentration erhöht, im Gegensatz zur O_2 -Konzentration. In diesem Fall nimmt die Fe-Adsorption durch die Pflanzenwurzeln ab. Infolge dessen wird das Wachstum der Wurzeln verzögert. Die entscheidende Rolle zur Entstehung der Eisenchlorose spielt jedoch der O_2 -Mangel des Bodens nicht. Nach PORTER und THORNE (1955) kann in vielen Fällen angenommen werden, daß die Erhöhung der CO_2 -Konzentration bei schlechter Belüftung des Bodens eher als Grund zur Eisenchlorose angesehen werden muß als die Verringerung der O_2 -Konzentration in kalkreichen Böden.

Die normale Luft enthält nur Spuren an CO_2 (0,03% Vol.). Trotzdem steigt seine Konzentration in den tieferen Schichten verschiedener Bodenarten bis zu 100% Vol. (CLAUSER und JENNY 1960). Der pH-Wert wird bei dem CO_2 -Druck von 1 atm von 7,8 auf 6,3 erniedrigt auf Grund der nachstehenden Reaktionsgleichung:



In diesem Fall wird das lösliche Eisen im Boden zu einer weniger löslichen Form umgesetzt.

Nach DEKOCK (1955) befindet sich bei niedrigem O_2 -Gehalt der Bodenluft das Eisen als Fe^{++} mit organischen Säuren in weniger nutzbaren Komplexformen gebunden.

4.4. Bodenfeuchtigkeit.

Durch hohe Bodenfeuchtigkeit, wobei der CO_2 -Druck steigt, werden Eisenverbindungen hydrolysiert mit anschließender Ausfällung und erneuter Festlegung des Eisens, speziell im kalkreichen Boden (PORTER und THORNE 1955, LINDSAY und THORNE 1954). Nach den Untersuchungen von ELGALA und MAIER (1964) steigt im Gegensatz zum Eisen, die Konzentration des löslichen Calciums bei hohem Wassergehalt im Boden an. Weiterhin befindet sich das Eisen bei starker Feuchtigkeit an organische Formen gebunden, wodurch die Eisenaufnahme stark beeinflusst wird.

4.5. Bodentemperatur.

Häufig wird die Wirksamkeit anorganischer Fe-Düngemittel von einer Erhöhung der Temperatur stark beeinflusst. Das führt oft zu schnellerer Zersetzung dieser Eisenverbindungen und Ausfällung des Eisens. Trotz der Thermo-Stabilität der Chelatverbindungen zeigten die Untersuchungen von WALLACE und Mitarbeitern (1955), daß hohe Temperaturen eine Fixierung des Chelat-Eisens, speziell im kalkreichen Boden verursachen. Hierbei wird das Eisen in der Hydroxyd- oder der Karbonat-Form ausgefällt.

4.6. Die Wirkung anderer Ionen.

Ionen in der Bodenlösung, sowohl die natürlich vorhandenen als auch die durch Düngemittel dem Boden zugeführten, beeinflussen die Wirkung der Eisendüngemittel, sowohl bei reinen Eisenverbindungen als auch bei Mischdüngern mit Eisen.

Nach Untersuchungen von CHRUSLOVA (1966) wird der Fe-Gehalt der Bodenlösung bei hohem P-Gehalt vermindert. Dadurch werden bereits in der Bodenlösung die Eisenverbindungen in Phosphat-form ausgefällt. Ferner wird das Eisen in der Pflanze als anorganisches Eisenphosphat festgelegt. Der Autor deutet weiterhin an, daß die Wechselbeziehungen zwischen Fe und P nicht völlig geklärt sind. Bei Verwendung von Fe-EDTA als Fe-Quelle treten die Auswirkungen hoher P-Gaben in wesentlich geringerem Ausmaß auf.

Ähnliche Ergebnisse erhielt auch DEKOCK (1955) bei seinen Untersuchungen des P/Fe-Verhältnisses als Faktor der Eisenchlorose. Hohe Phosphorgaben führen danach zur Eisenchlorose oder Phosphortoxizität, während bei hohen Eisengaben die Pflanzen häufig Phosphormangel zeigen oder das Eisen toxisch wirkt. BROWN und HOLMES (1955) studierten ebenso das Verhältnis Cu/P als eine weitere Ursache für das Auftreten der Eisenchlorose. Die Autoren stellten fest, daß Sojabohnen bei ungeregeltem Cu/P-Verhältnis für die Eisenchlorose anfällig sind. Die Autoren sind aber der Ansicht, daß das Cu/P-Verhältnis keine entscheidende Rolle beim Auftreten von Eisenmangel spielt, sondern daß hierfür vor allem der Gehalt an CaCO_3 und HCO_3^- verantwortlich ist. Es erscheint aber trotzdem erforderlich, daß bei verstärk-

ter P- und Cu-Düngung gleichzeitig die Eisendüngung beachtet werden muß.

Als weiteren möglichen Grund für die Eisenchlorose betrachten STEWART und LEONARD (1952) die Konkurrenzwirkung der Schwermetallionen wie Cu, Mn, Zn, Ni und Co im Boden. Die gleichen Autoren weisen darauf hin, daß Chloroseerscheinungen eher an Pflanzen auftreten, die mit Calcium schlecht ernährt sind.

4.7. Boden-Mikroorganismen.

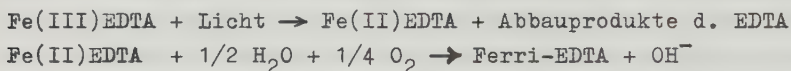
Lange Zeit hat man sich nach der Herkunft der chelatartigen Verbindungen im Boden gefragt, welche die Fähigkeit besitzen, das Eisen in aufnehmbarer Form zu halten. Vermutungen von CLAUSER und JENNY (1960) gehen dahin, daß diese Verbindungen von den Bodenmikroorganismen, die in der Rhizosphäre leben, ausgeschieden werden. Bei einigen Mikroorganismen besteht eine Spezifität für die Ausscheidung bestimmter Verbindungen. Weitere vorteilhafte Wirkungen dieser Organismen sind die Verbesserung der Bodenstruktur, die die Austauschprozesse zwischen der Luft und den Bodengasen ermöglicht. HAERTELL (1963) betrachtet das Verhältnis zwischen den Bodenmikroorganismen und dem Eisen als symbiontisches Leben. Neben der vorteilhaften Haltung des Eisens in löslicher Form nutzen diese Mikroorganismen es gleichzeitig für ihre physiologischen Funktionen aus.

Die Mikrosymbiose beeinflusst die durch Eisendüngung zugeführten Chelatverbindungen im Boden nur wenig. Nach WALLACE (1957 und 1963) besitzen die Polyaminopolyacetat-Chelatverbindungen eine gewisse Resistenz gegen Mikroorganismen. Trotzdem gibt es keine völlig stabile Chelatverbindung gegenüber der Abbauwirkung solcher Mikroben. Weiterhin beobachtete der Autor, daß manche Bakterienarten, bei hoher Konzentration an unlöslichem Eisen im Boden, eine lösliche aufnehmbare Form ähnlich dem Eisenchelat synthetisieren können. Dieser Meinung haben JENNY und POZUELO (1965) widersprochen. Die Autoren meinen: "Die Rolle der Mikroben als Chelatlieferanten kann ausgeschaltet werden. Kürzlich gelang es Frau Dr. M.R.F. Pozuelo, sterile Pflanzen von Luzerne in alkalisch reagierender Fe_2O_3 -Sandkultur zu ziehen. Sie waren grün und akkumulierten Eisen." Es erscheint aber

fraglich, ob auf Grund dieses Versuches die Synthese chelatar-tiger Verbindungen durch Mikroorganismen als bedeutungslos hin-gestellt werden kann.

4.8. Die Wirkung des Tageslichtes auf die Chelatverbindungen.

Dieser Faktor hat nur Bedeutung, wenn sich die gedüngten Chela-te an der Bodenoberfläche befinden. Nach den Untersuchungen von HILL-COTTINGHAM (1955 und 1957) wird Fe(III)EDTA durch ul-traviolette Strahlen des Tageslichtes zu der weniger stabilen Form Fe(II)EDTA reduziert:



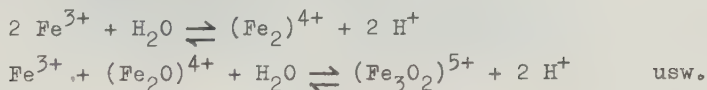
Durch weitere Photoreduktion und Reoxydation steigt die Konzen-tration von OH^- -Ionen, und es bildet sich Fe(OH)EDTA . Im Endef-fekt fällt Fe(OH)_3 aus. Eine große Rolle dürfte aber die Zerset-zung der Chelatverbindungen des Bodens durch das Tageslicht nicht spielen.

Sehr wahrscheinlich ist das Zusammenwirken der genannten Fakto-ren und vielleicht noch anderer, bisher unbekannter, die ent-scheidende Ursache der Eisenchlorose. E i n Faktor allein kann nicht die Hauptursache sein, die zum Eisenmangel führt. Als Bei-spiel dafür dient das gesunde Wachstum verschiedener Pflanzen-arten in kalkreichen Böden und anderseits die Chloroseerschei-nungen an vielen Pflanzenarten, die in Böden mit löslichem, auf-nehmbarem Eisen gewachsen sind. Trotzdem stellt in den meisten Fällen der Mangel an löslichem, aufnehmbarem Eisen das Haupt-problem zur Entstehung der Eisenchlorose dar.

5. Die Umwandlung des Eisens im Boden.

Die Kenntnis des Bindungszustandes des Eisens im Boden ist in verschiedener Hinsicht von Interesse. So erscheint ein solches Wissen einerseits für die Bodengenetik bedeutsam; denn die Ver-lagerung vom Eisen im Profil hängt von seiner Bindung ab. Auf der anderen Seite profitiert aber auch die Pflanzenernährungs-lehre davon, man denke nur an die von der Fe-Bindung abhängige

Aufnehmbarkeit durch die Pflanze. Weiterhin macht die Ablagerung von nicht aufnehmbaren Eisenverbindungen die Eisernährung schwer bis unmöglich. Zum Beispiel kann die Ablagerung von Eisenoxiden als Endprodukt einer Reihe von Reaktionen bei ungeeigneten Bodenverhältnissen stattfinden. Nach McKAGNE (1966) kann die Ablagerung solcher Oxyde nicht durch die Oxydation oder durch die Fixierung von Fe^{2+} auf die natürliche Eisenoxydoberfläche des Bodens entstehen. Die wichtigste Ursache für die Eisenoxydbildung sind vielmehr Oxydationsprozesse, denen die Eisenhydroxyde im Boden unterliegen. Die Bildung solcher Hydroxyde wirkt als Mittelpunkt, der zur weiteren Festlegung der neu gebildeten, unlöslichen Eisenformen hinführt. SCHILLING und RICHTER (1967) befaßten sich mit dem Problem der Ausfällung von Eisenhydroxyden. Die Autoren stellten während ihrer Untersuchungen fest, daß bereits unterhalb des für quantitative Fällung der Hydroxyde verantwortlichen pH-Wertes in erheblichem Umfang Fe der Lösung entzogen wird und nicht mehr austauschbar am Sorptionsträger (SiO_2) gebunden ist. Die Bindung des Eisens in nicht austauschbarer Form läßt sich am leichtesten über die Entstehung kleiner Molekülaggregate zu Beginn der Hydroxydbildung erklären. Ihren Aufbau könnte man sich etwa folgendermaßen vorstellen:



Auf diese Weise würden mehrkernige Kationen der Form $-\text{Fe}-\text{O}-\text{Fe}-$ entstehen, die eventuell untereinander vernetzt sind bzw. an freien Valenzen OH-Gruppen tragen. Für die Fe-Aufnahme würde das bedeuten, daß sie unter natürlichen Verhältnissen praktisch stets aus einem Milieu erfolgen müßte, in dem Fe(III) kaum noch als Ion vorliegt. Daher dürften Chelatisierung und Ansäuerung im Wurzelbereich eine wichtige Rolle spielen. Obwohl beim pH-Wert 5,5 das meiste Eisen in Hydroxyd-Form ausfällt, konnte CLARK (1964) keine durch Silikate fixierte Eisenverbindung feststellen. MARTELL (1957) und RATHJE (1960) meinen dagegen, daß außer den Silikaten auch die Bicarbonate, Oxalate und teilweise auch die Phosphate in bestimmten pH-Bereichen zur Ausfällung bzw. zur Fixierung der Eisenverbindungen im Boden führen.

III E i g e n e U n t e r s u c h u n g e n

Aus der Literaturübersicht geht hervor, daß zwar in den letzten 15 Jahren unser Wissen über die Fragen der Eisenversorgung der Pflanzen und die Kenntnis der Faktoren, die im Boden die Verfügbarkeit des Eisens bestimmen, ganz wesentlich erweitert worden ist, daß aber auch noch eine ganze Reihe von Fragen einer weiteren Klärung bedarf. Im Rahmen dieser Arbeit wurden im Zusammenhang mit dem Fragenkomplex Eisen im Boden folgenden Problemen nachgegangen:

1. Welche Unterschiede weisen verschiedene Eisenformen (Eisenchlorid, Eisenchelat = Fe-EDTA, Eisencitrat) in Hinblick auf ihre Verlagerung bzw. Auswaschung in verschiedenen Böden auf?
2. Welche Unterschiede bestehen bei der Umwandlung bzw. Mineralisierung einiger Eisenchelatverbindungen (Fe-Natrium EDTA (Fe-Natriumsalz der Äthylendiamintetraessigsäure); Fe-Natriumsalz der Monooxäthylamino-diessigsäure, Fe-Natriumsalz der Nitrilotriessigsäure und Fe-Komplexsalz der Diäthanolaminoessigsäure)?

1. Auswaschungsversuch.

Werden anorganische und organische Eisensalze auf oder in den Boden gebracht, so unterliegen sie dem Einfluß einer ganzen Reihe bekannter und unbekannter Faktoren. Einer dieser Faktoren, der für die Verlagerung bzw. Auswaschung eine besondere Rolle spielt, ist die Menge und die Geschwindigkeit des Sickerwassers. Zur Terminologie sei bemerkt, daß unter "Verlagerung" die Bewegung des Eisens innerhalb der Bodensäule zu verstehen ist, unter "Auswaschung" der Austritt des Eisens aus dem unteren Teil der Bodensäule.

Drei verschiedene Eisenverbindungen, in denen das Eisen mit ⁵⁹Fe markiert war, wurden hinsichtlich ihrer Verlagerung und Auswaschung auf 4 verschiedenen Böden untersucht.

1.1. Material und Methodik.

- a) Für die Untersuchungen wurden Säulen aus Polyvinylchlorid (PVC) verwendet, wie sie in Abb. 1 dargestellt sind.

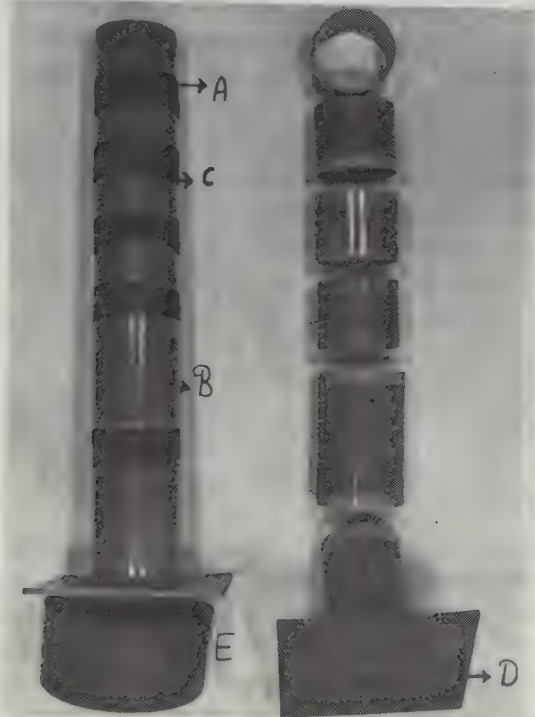


Abb. 1

Jede Säule besteht aus 6 Abschnitten, von denen die beiden unteren (B) je 10 cm, die vier oberen (A) je 5 cm lang sind. Der innere Durchmesser beträgt 5,6 cm, die Fläche des Querschnitts $24,6 \text{ cm}^2$. Die Gesamthöhe der Säule beträgt also 40 cm, der Rauminhalt 1 Liter. Die einzelnen Abschnitte der Säule werden mit Gummiringen (C) zusammengehalten. Der unterste Abschnitt sitzt auf einer durchlöchernten PVC-Platte (D). Hier tritt das Sickerwasser aus, nachdem es je eine Scheibe aus Leinen und Filterpapier passiert hat. Das Sickerwasser wird in einem Gefäß (E), auf dem die gesamte Bodensäule steht, aufgefangen. Jede Variante des Versuches wurde mit 2 Säulen durchgeführt, der gesamte Versuch umfaßte also $12 \times 2 = 24$ Säulen.

b) Die Versuche wurden mit folgenden Böden durchgeführt:

- b.a) Boden Darmstadt (kalkhaltig), leichter Sandboden, pH (H_2O) 8,3; 2,2% $CaCO_3$, maximale Wasserkapazität 21,3%, arm an Makronährstoffen.
- b.b) Boden Dachau, kalkreicher Niedermoorboden, pH (H_2O) 8,4; 8,4% $CaCO_3$, maximale Wasserkapazität 80%, Bor- und Manganmangelboden.
- b.c) Boden Oldenburg, saurer humoser Sandboden, pH (H_2O) 4,5; maximale Wasserkapazität 28,6%, Kupfermangelboden.
- b.d) Boden Oldenburg, wie unter c), aber mit $CaCO_3$ auf pH (H_2O) 7,0 aufgekalkt, maximale Wasserkapazität 26,1%.

Auf sämtlichen Versuchsböden hatten in bisherigen Versuchen die Pflanzen keine Eisenmangelerscheinungen gezeigt.

c) Die drei Eisensalze:

Eisenchlorid, $FeCl_3 \cdot 6 H_2O$

Eisenchelat, Fe-EDTA (Fe-Natriumsalz der Äthylendiamin-tetra-essigsäure)

Eisencitrat, Mol.Gew. 383

d) Die Herstellung der markierten Eisensalze:

Von jedem Eisensalz wurde eine Stammlösung mit jeweils 2 mg Fe/ml angesetzt. Anschließend wurde die Markierung dieser Lösungen mit radioaktiven ^{59}Fe das als $^{59}FeCl_3$ vorlag, vorgenommen. Jede Säule wurde nun mit ihrer für sie bestimmten, markierten Eisensalzlösung behandelt, d.h., jede Säule erhielt 12 ml der entsprechenden Lösung, auf drei Tage verteilt (jeden Tag 4 ml und zwar am 6., 7. und 8. Mai 1965), die die gleiche ^{59}Fe -Aktivität und Eisenkonzentration besaßen. In 12 ml der markierten Eisensalzlösung waren enthalten 12,3 mg Fe mit $\mu C^{59}Fe$.

Bei Versuchsbeginn ergaben je

1 ml mark. Eisenchloridstandardlösung 497181 imp/min

1 ml mark. Eisenchelatstandardlösung 496604 imp/min

1 ml mark. Eisencitratstandardlösung 474505 imp/min

Die Messung der Radioaktivität erfolgte im Seintillationszähler mit einem Messgerät der Firma "Friesecke-Hoepfner".

Die luftgetrockneten, auf 2 mm gesiebten Böden wurden gleichmäßig und in sehr kleinen Portionen in die Säulen eingefüllt bis zu einer Höhe von 2 cm unter dem Rand. Die Menge des eingefüllten Bodens wurde ermittelt. Die so gefüllten Säulen wurden dann in ein mit dest. Wasser gefülltes Becken so lange hinein gestellt bis das von unten eindringende Wasser an der Oberfläche hervortrat. Nach Abtropfen des überschüssigen Wassers wurden die Säulen wiederum gewogen und die Menge des festgehaltenen Wassers ermittelt. Schwierigkeiten ergaben sich bei dem Niederungsmoorboden Dachau, der einmal schwer benetzbar ist und anderseits bei der Befeuchtung quillt. Die betreffenden Säulen wurden deshalb mit bereits angefeuchtetem Boden gefüllt.

Die Säulen, die in einem vor Licht geschützten Raum bei einer durchschnittlichen Temperatur von 11°C aufgestellt waren, wurden täglich ab 9.5.1965 mit 15 ml dest. Wasser beregnet. Diese Beregnung dauerte 84 Tage, und es wurden somit auf jede Säule 1260 ml Wasser aufgegeben, entsprechend etwa 500 m/m Niederschläge.

In der Zeit vom 9.5. bis 30.7.1965 wurde das gesammelte Sickerwasser jeder Säule dreimal zur weiteren Untersuchung (1. am 27.5.1965 nach 114 m/m Beregnung, 2. am 26.6.1965 nach 180 m/m Beregnung und 3. am 30.7.1965 nach 210 m/m Beregnung) abgenommen (Tab. 1), wobei bei der letzten (dritten) Entnahme auf das völlige Austropfen der Säulen geachtet wurde.

e) Die Untersuchung der Sickerwässer.

e.a) Messung des pH-Wertes (Tab.2)

e.b) Bestimmung des Gesamteisens mit der α, α' -Dipyridyl-Methode (Tab. 3, 4, 5 und 6)

e.c) Messung der Radioaktivität (Tab. 3, 4, 5 und 6). Hierzu wurden 200 ml Sickerwasser eingedampft, und der organische Rückstand mit 5 ml konz. HNO_3 zerstört. Der Rest wurde mit 4 ml $1/2$ n HCl aufgenommen. In 2 ml hiervon wurde die Aktivität mit dem Seintillationszähler gemessen. Zu erwähnen ist, daß beim Boden Dachau z.T. geringere Sickerwassermengen aufgefangen wurden als bei den ande-

ren Böden, auf Grund der schlechten Durchlässigkeit. Die Messungen wurden aber in jedem Fall auf die vorliegende Menge Sickerwasser bezogen. Bei der Auswertung des Messergebnisses wurde der Zeitfaktor berücksichtigt (die Halbwertszeit von ^{59}Fe beträgt 45 Tage).

1.2. Die Ergebnisse der Sickerwasser-Untersuchung.

a) Die Menge des Sickerwassers:

Aus Tabelle 1 ist zu ersehen, daß bei der ersten Probeentnahme vom 27.5.1965 die Menge des Sickerwassers aller Bodensäulen, mit Ausnahme des Bodens Dachau, mit kleinen Schwankungen einheitlich war.

Der Boden Dachau ergab keine bis geringe Mengen an Sickerwasser. Bei der zweiten (vom 26.6.1965) und der dritten (vom 30.7.1965) Entnahme sind die Mengen, abgesehen von kleinen Schwankungen, uneinander gleich, wobei sich der Boden Dachau den anderen Böden angeglichen hat, mit Ausnahme der Säulen 11 und 12, wo auch bei den späteren Entnahmen die Menge des Sickerwassers gering blieb.

Tab. 1

Sickerwassermenge (in ml) bei den verschiedenen Abnahmen.

Böden	Probenahme	Fe-Chlorid		Fe-EDTA		Fe-Citrat	
		1	2	3	4	5	6
Darmstadt (kalkhaltig)	27.5.	260	260	260	260	255	260
	26.6.	415	415	425	415	415	410
	30.7.	500	500	510	510	500	500
		7	8	9	10	11	12
Dachau (kalkreich)	27.5.	158	135	165	160	-	-
	26.6.	405	380	400	395	220	220
	30.7.	490	370	500	480	190	220
		13	14	15	16	17	18
Oldenburg (sauer)	27.5.	255	260	265	265	260	255
	26.6.	410	410	410	405	390	390
	30.7.	480	505	500	500	500	500
		19	20	21	22	23	24
Oldenburg (neutral)	27.5.	260	265	255	245	260	260
	26.6.	410	415	410	410	410	405
	30.7.	500	500	485	490	500	500

b) Der pH-Wert. (Tab. 2):

Eine wesentliche Veränderung des pH-Wertes im Verlauf des Versuches wurde nicht festgestellt. Bei der zweiten Probeentnahme war bei dem mit Fe-Chlorid behandelten, aufgekalkten Boden Oldenburg ein Absinken des pH-Wertes zu verzeichnen. Die Vermutung liegt nahe, daß das Eisenchlorid im Boden der Hydrolyse unterworfen war, wobei das Eisen in die Hydroxyd-Form überführt wurde und die Chlorid-Ionen mit freien H^+ -Ionen zu HCl zusammentraten, was den pH-Wert zeitweilig erniedrigt haben mag.

Tab. 2

pH-Wert des Sickerwassers

Böden	Probenahme	Fe-Chlorid		Fe-EDTA		Fe-Citrat	
		1	2	3	4	5	6
Darmstadt	27.5.	8,3	8,4	8,2	8,3	8,3	8,3
(kalkhal-	26.6.	8,2	8,2	8,5	8,4	8,6	8,6
tig)	30.7.	8,1	8,0	8,1	8,1	8,1	8,0
		7	8	9	10	11	12
Dachau	27.5.	8,1	8,3	8,4	8,5	-	-
(kalk-	26.6.	8,3	8,2	8,2	8,2	8,1	8,3
reich)	30.7.	8,0	8,0	8,0	7,9	8,0	8,0
		13	14	15	16	17	18
Oldenburg	27.5.	5,0	4,6	4,3	4,8	4,6	4,7
(sauer)	26.6.	4,3	4,5	4,3	4,4	4,3	4,3
	30.7.	4,6	4,6	4,7	4,9	5,0	4,6
		19	20	21	22	23	24
Oldenburg	27.5.	6,8	7,5	6,6	6,8	7,3	6,8
(neutral)	26.6.	5,8	5,6	6,8	6,8	6,5	5,9
	30.7.	6,6	6,8	7,0	7,0	6,5	6,7

c) Das Verhältnis zwischen Gesamteisen und markiertem Eisen:

Im Sickerwasser des Bodens Darmstadt (kalkhaltig - pH 8,3) (Tab. 3) bestanden bei der ersten Probeentnahme keine wesentlichen Unterschiede im Gesamteisengehalt zwischen den einzelnen Eisensalzen. Weiterhin konnte im Sickerwasser dieser Periode keine Radioaktivität festgestellt werden, was sich dadurch erklären läßt, daß die zugegebenen Eisenverbindungen noch nicht die Säulen durchlaufen haben.

Die zweite Probeentnahme, die in allen Bodenarten bedeutsame Ergebnisse zeigte, ergab im Boden Darmstadt (kalkhaltig), in den mit Eisenchlorid und Eisencitrat behandelten Säulen, weitgehende Übereinstimmung hinsichtlich des Gesamteisengehaltes und der Radioaktivität. Das Sickerwasser der mit Eisenchelat behandelten Säulen hingegen wich von diesen Werten stark ab. Es zeigte sich, daß hier das ausgewaschene gesamte Eisen etwa 3 mal und die Aktivität etwa 6 mal so hoch lag wie bei den mit Fe-Chlorid behandelten Säulen.

Die dritte Probeentnahme ähnelte in ihren Werten der ersten, mit Ausnahme des Sickerwassers der mit Eisenchelat behandelten Säulen. Hier wurde im Vergleich zur ersten Probeentnahme eine kleine Erhöhung der Menge des gesamten Eisens, und ein Abfall der Radioaktivität auf $\frac{2}{3}$ der zweiten Probeentnahme festgestellt. Abschließend kann gesagt werden, daß von der zugegebenen markierten Eisenchloridlösung 0,0065%, von der Eisenchelatlösung 0,065% und von der Eisencitratlösung 0,0056% ausgewaschen wurden; Eisenchelat wurde also, wenn auch in absolut geringer Menge, 10 fach stärker ausgewaschen als die beiden anderen Salze (Tab. 7).

Beim Boden Dachau (kalkreich - pH 8,4) (Tab. 4) fiel in der ersten Probeentnahme nur bei den mit Eisenchlorid und Eisenchelat behandelten Säulen Sickerwasser an, in dem ähnliche Werte an Gesamteisen und das Fehlen an Radioaktivität festgestellt wurden.

Die zweite Probeentnahme ergab hingegen auffällige Werte, die auf die Eigenart des Bodens zurückzuführen sind. Zum Beispiel lagen hier die Gehalte des Sickerwassers der mit Eisenchlorid

behandelten Säulen an Gesamteisen 1,6 mal und an Radioaktivität 2,5 mal höher als das Sickerwasser der mit Eisencitrat behandelten Säulen, obwohl man hätte vermuten können, daß das Eisencitrat auch im höheren pH-Bereich stabiler und beweglicher wäre als das Eisenchlorid. Im Sickerwasser der mit Eisenchelate behandelten Säulen lagen deutlich höhere Werte an Gesamteisen (etwa 2-3 mal) und an Radioaktivität (etwa 9-25 mal höher) vor als im Vergleich mit Eisenchlorid und Eisencitrat.

Auch hier konnte bei der dritten Probeentnahme eine Ähnlichkeit mit der ersten hinsichtlich des Gehaltes an Gesamteisen und an Aktivität bei den mit Eisenchlorid und Eisencitrat behandelten Säulen festgestellt werden.

Das Sickerwasser der mit Eisenchelate behandelten Säulen dagegen wies bei der dritten Probenahme etwa 1,5 mal höhere Werte an Gesamteisen im Vergleich zum Eisenchlorid und Eisencitrat auf. Die Radioaktivität der Eisenchelatesäulen betrug bei der dritten Probenahme etwa $\frac{1}{4}$ des Wertes bei der zweiten Entnahme. Zusammenfassend läßt sich sagen, daß von der zugegebenen Eisenchloridlösung 0,0076%, von der Eisenchelatlösung 0,091% und von der Eisencitratlösung 0,0024% in dieser Bodenart ausgewaschen wurde.

Bei der sauren Bodenart Oldenburg (pH 4,5) (Tab. 5) konnte bei der ersten Probenahme wesentlich höhere Werte an ausgewaschenem Gesamteisen im Sickerwasser, mit kleiner Erhöhung bei Eisenchelate und geringe Erniedrigung bei Eisencitrat im Vergleich zu Eisenchlorid, festgestellt werden. Auch hier wurde keine Radioaktivität gemessen.

In der zweiten Probeentnahme ergaben sich beim Eisenchlorid hohe Werte an Gesamteisen und eine sehr geringe Menge an Radioaktivität. Bei Eisenchelate dagegen lagen im Vergleich zu Eisenchlorid die Werte an Gesamteisen etwa um die Hälfte niedriger, und die Aktivität waren etwa 18 mal höher. Das Eisencitrat ergab im Vergleich zu Eisenchlorid einen niedrigeren Wert an Gesamteisen und etwa die gleiche Menge an Radioaktivität.

Bei der dritten Probeentnahme wurde, im Vergleich zu der zweiten, bei Eisenchlorid etwa die 10 fache Menge, aber bei Eisen-

chelat die 30 fache Menge und bei Eisencitrat etwa die 28 fache Menge an Gesamteisen ausgewaschen. An Aktivität konnte nur bei Eisenchelat ein Drittel derjenigen bei der zweiten Probeentnahme gemessen werden.

Die Untersuchung dieses Bodens zeigte, daß von der zugegebenen Eisenchloridlösung 0,014%, von der Eisenchelatlösung 0,33% und von der Eisencitratlösung 0,015% ausgewaschen wurden.

Der aufgekalkte Boden Oldenburg (pH 7,0) (Tab. 6) ergab wie bei allen Bodenarten in der ersten Periode keine Radioaktivität. Beim Vergleich des Gesamteisens bei der ersten Probeentnahme mit dem sauren Boden Oldenburg ergibt sich bei Eisenchlorid ein Drittel, bei Eisencitrat ein Viertel und bei Eisenchelat etwa der gleiche Wert an ausgewaschenem Eisen.

Bei der zweiten Probeentnahme war auf beiden Böden bei Eisenchlorid und Eisencitrat etwa die gleiche Radioaktivität festzustellen. Bei Eisenchelat betrug sie in der zweiten Entnahme ein Zehntel des Wertes vom sauren Boden. Das Gesamteisen ist bei Eisenchlorid auf ein Viertel des Wertes des sauren Bodens abgesunken, bei Eisencitrat um ein Viertel und bei Eisenchelat um das 4 fache gestiegen. Das Gesamteisen bei der letzten Probeentnahme beträgt auf dem aufgekalkten Boden bei Eisenchlorid und Eisencitrat ein Siebtel und bei Eisenchelat ein Sechstel der Werte beim sauren Boden.

In diesem Boden wurde von den zugegebenen markierten Eisensalzen 0,015% bei Eisenchlorid und Eisencitrat, und 0,054% bei Eisenchelat ausgewaschen.

Tab. 3

Eisenauswaschung im Boden "Darmstadt" (kalkhaltig).

Fe-Salze	Probe- nahme	Gesamt-Eisen (γ)			markiertes-Eisen (γ)		
		a	b	Mittel a+b	a	b	Mittel a+b
Fe-Chlorid	27.5.	5,2	7,8	6,5	-	-	-
	26.6.	83,0	66,0	74,5	0,86	0,72	0,79
	30.7.	5,0	6,5	5,7	-	-	-
	Gesamt	93,2	80,3	86,7	0,86	0,72	0,79
Fe-EDTA	27.5.	7,8	7,8	7,8	-	-	-
	26.6.	302,2	249,0	275,6	4,7	4,4	4,5
	30.7.	10,2	8,7	9,4	3,35	3,6	3,5
	Gesamt	320,2	265,5	292,8	8,05	8,0	8,0
Fe-Citrat	27.5.	6,4	6,5	6,5	-	-	-
	26.6.	97,1	82,2	89,6	0,53	0,85	0,69
	30.7.	6,0	6,5	6,2	-	-	-
	Gesamt	109,5	95,2	102,3	0,53	0,85	0,69

Tab. 4

Eisenauswaschung im Boden "Dachau" (kalkreich).

Fe-Salze	Probe- nahme	Gesamt-Eisen (γ)			markiertes-Eisen (γ)		
		a	b	Mittel a+b	a	b	Mittel a+b
Fe-Chlorid	27.5.	30,0	24,3	27,1	-	-	-
	26.6.	162,0	124,6	143,3	0,82	1,07	0,94
	30.7.	29,4	27,7	28,5	-	-	-
	Gesamt	221,4	176,6	198,9	0,82	1,07	0,94
Fe-EDTA	27.5.	29,7	20,0	24,8	-	-	-
	26.6.	232,0	260,7	246,3	7,35	10,6	8,97
	30.7.	42,5	43,2	42,8	1,7	3,3	2,5
	Gesamt	304,2	323,9	313,9	9,05	13,9	11,47
Fe-Citrat	27.5.	-	-	-	-	-	-
	26.6.	74,8	101,2	88,0	0,5	0,2	0,35
	30.7.	24,7	28,6	26,6	-	-	-
	Gesamt	99,5	129,8	114,6	0,5	0,2	0,35

Tab. 5

Eisenauswaschung im Boden "Oldenburg,sauer".

Fe-Salz	Probe- nahme	Gesamt-Eisen (T)			markiertes-Eisen (T)		
		a	b	Mittel a+b	a	b	Mittel a+b
Fe-Chlorid	27.5.	841,5	917,8	879,6	-	-	-
	26.6.	721,6	705,2	713,4	1,66	1,98	1,82
	30.7.	7200,0	8080,0	7640,0	-	-	-
	Gesamt	8763,1	9703,0	9233,0	1,66	1,98	1,82
Fe-EDTA	27.5.	1219,0	887,8	1053,4	-	-	-
	26.6.	229,6	380,7	305,1	31,5	29,6	30,5
	30.7.	10625,0	10000,0	10312,5	8,7	10,95	9,8
	Gesamt	12073,6	11268,5	11671,0	40,2	40,55	40,3
Fe-Citrat	27.5.	728,0	645,2	686,6	-	-	-
	26.6.	327,6	191,1	259,3	1,7	2,1	1,9
	30.7.	8000,0	6500,0	7250,0	-	-	-
	Gesamt	9056,6	7336,3	8195,9	1,7	2,1	1,9

Tab. 6

Eisenauswaschung im Boden "Oldenburg,neutral".

Fe-Salz	Probe- nahme	Gesamt-Eisen (T)			markiertes-Eisen (T)		
		a	b	Mittel a+b	a	b	Mittel a+b
Fe-Chlorid	27.5.	267,8	212,0	239,9	-	-	-
	26.6.	172,2	174,3	173,2	2,1	1,6	1,8
	30.7.	1000,0	1175,0	1087,5	-	-	-
	Gesamt	1440,0	1561,3	1500,6	2,1	1,6	1,8
Fe-EDTA	27.5.	841,5	1274,0	1057,7	-	-	-
	26.6.	1369,4	1607,2	1488,3	2,7	3,7	3,2
	30.7.	1746,0	1617,0	1681,5	3,1	3,7	3,4
	Gesamt	3956,9	4498,2	4227,5	5,8	7,4	6,6
Fe-Citrat	27.5.	122,2	174,2	148,2	-	-	-
	26.6.	320,0	340,2	330,1	1,4	2,4	1,9
	30.7.	1075,0	1028,0	1051,5	-	-	-
	Gesamt	1517,2	1542,4	1529,8	1,4	2,4	1,9

1.3. Diskussion über die Auswaschung.

Die vorangegangenen Untersuchungen, die mit der Berechnung der mit verschiedenen Eisensalzen behandelten Bodensäulen begann, führten zu folgenden Ergebnissen:

- a) Bei der ersten Probenahme konnte auf keinem Boden und bei keinem Eisensalz eine Aktivität nachgewiesen werden. Das läßt sich dadurch erklären, daß zu diesem Zeitpunkt die zu den Bodensäulen gegebenen Eisensalze noch nicht mit dem Beregnungswasser ausgewaschen wurden.
- b) Bei der zweiten Probenahme wurde bei allen Böden und allen Eisensalzen Radioaktivität gemessen. Bei der dritten Probenahme konnte keine Radioaktivität gemessen werden mit Ausnahme der Eisenchelatsäulen.
- c) Während die größte Menge an ausgewaschenem Gesamteisen bei den Böden Darmstadt (kalkhaltig) und Dachau (kalkreich) in der zweiten Probenahme festgestellt wurde, äußerte sich dieses Verhalten bei den Böden Oldenburg sauer und neutral, wo die Mengen an Gesamteisen in der ersten Probenahme höher lagen als in der zweiten (mit Ausnahme des mit Eisenchelat behandelten neutralen Bodens Oldenburg). Bei der dritten Probenahme war wieder ein erheblicher Anstieg zu verzeichnen. Es kann sein, daß die vorhandenen löslichen Eisenformen in der Hauptsache bereits in der ersten Periode ausgewaschen wurden und in der zweiten Periode eine Erniedrigung eintrat. Mit laufender Auswaschung entstand möglicherweise eine Bodenreaktion, bei der das Eisen in der dritten Periode wieder in erheblichen Mengen ausgewaschen wurde.
- d) Trotz der Instabilität der Chelatverbindungen in höheren pH-Bereich wurde sie in geringerem Maße vom Boden festgehalten als die beiden anderen Eisensalze (Tab. 7 und Abb. 2).

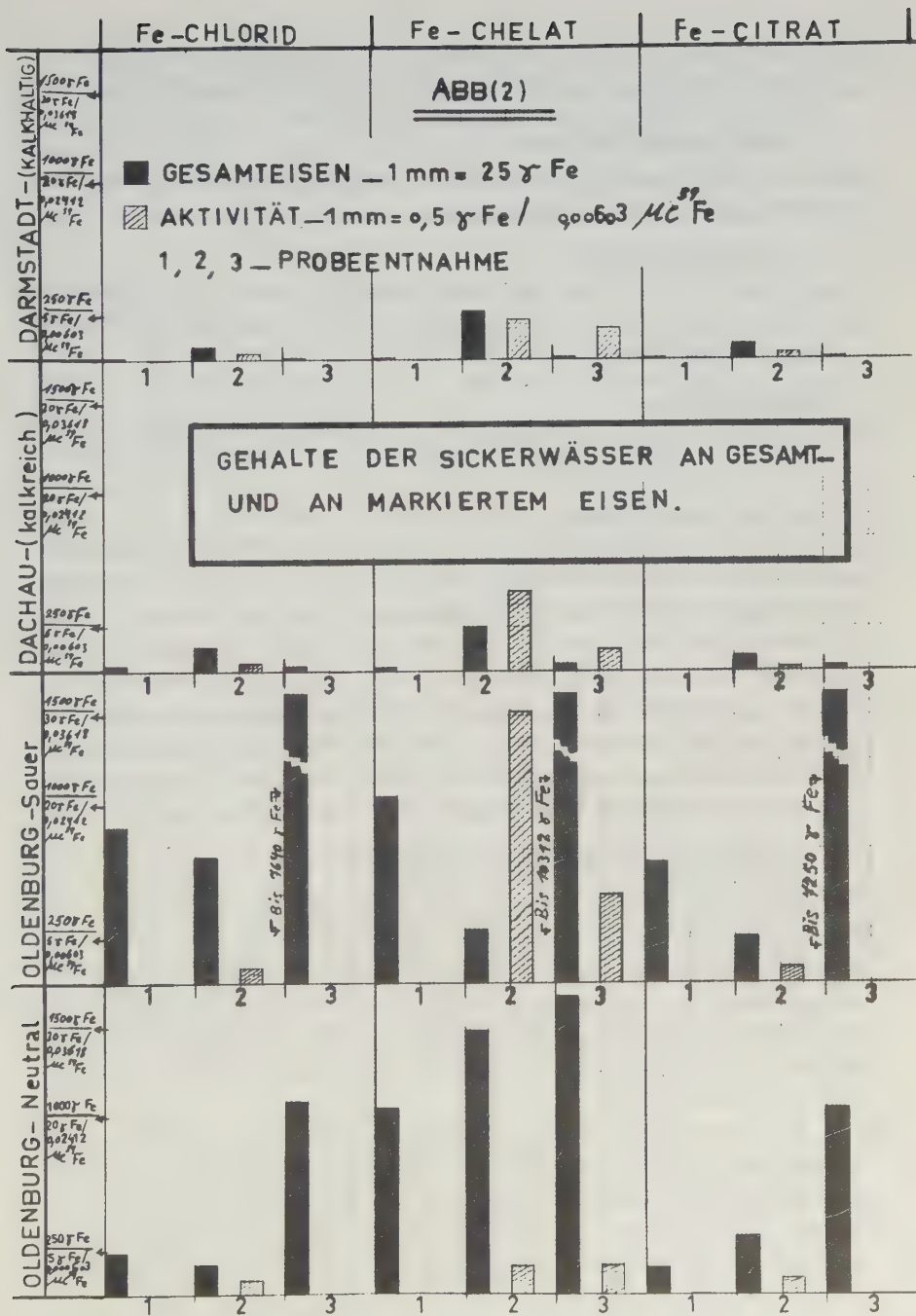
1.4. Die Untersuchung der Säulen.

Die Untersuchungen der Säulenabschnitte folgten den Untersuchungen des Sickerwassers. Sie sollten die Verlagerung der den Bodensäulen zugegebenen Eisensalze und ihre Festlegung in den Säulen verfolgen. Mit Hilfe der wässrigen Extraktion konnten die noch wasserlöslichen Anteile der zugegebenen Eisensalze ermit-

Tab. 7

Die prozentualen Gehalte der Sickerwässer
an ausgewaschenem markiertem Eisen.

Böden	Fe-Chlorid		Fe-EDTA		Fe-Citrat	
	a	b	a	b	a	b
Darmstadt (kalkhtg)	0,007 0,0065%	0,0059	0,065 0,065%	0,065	0,0043 0,0056%	0,007
Dachau (kalkr.)	0,0066 0,0076%	0,0087	0,073 0,091%	0,11	0,003 0,0024%	0,0018
Oldenburg (sauer)	0,013 0,015%	0,016	0,33 0,33%	0,33	0,014 0,015%	0,017
Oldenburg (neutral)	0,017 0,015%	0,013	0,047 0,054%	0,060	0,01 0,015%	0,019



telt und durch $n/2$ Salzsäureauszüge die festgelegten Anteile dieser Salze in den Säulenabschnitten nachgewiesen werden.

1.5. Material und Methodik.

Nach der Auftrennung der Bodensäulen wurde der Boden jedes Abschnittes getrocknet und gewogen.

a) $n/2$ Salzsäureauszug.

Boden wurde mit $n/2$ HCl im Verhältnis 1:5 unter Berücksichtigung des Kalkgehaltes der beiden Böden Darmstadt und Dachau 5 Std. lang ausgeschüttelt.

b) Wasserauszug.

Hier wurde ebenfalls der Boden mit aqua dest. im Verhältnis 1:5 5 Std. lang ausgeschüttelt.

c) Weitere Bearbeitung:

Nach dem fünfstündigen Ausschütteln, sowohl bei $n/2$ HCl-Auszügen als auch bei Wasserauszügen, wurden die Proben filtriert. Von diesem Filtrat wurde ein aliquoter Teil (meistens 100 ml) im Becherglas eingedampft. Das organische Material des eingedampften Filtrats wurde mit 5 ml konz. HNO_3 zerstört und die Säure abgeraucht. Der Rückstand wurde in 4 oder 5 ml $n/2$ HCl gelöst. In 2 ml dieser Lösung wurde die Radioaktivität gemessen. Bei der Umrechnung der Aktivität wurde auf den gesamten Extrakt, bzw. auf die gesamte Bodenmenge jedes Abschnittes bezogen.

1.6. Ergebnisse der Bodenuntersuchungen.

Aus Abb. 3 ist zu ersehen, daß im Boden Darmstadt (kalkhaltig) das Eisencitrat und das Eisenchlorid ähnlich verlagert wurden. Die Hauptmenge der beiden Salze wurde bereits im ersten Abschnitt festgelegt. Ein Unterschied bestand nur darin, daß das Eisenchlorid in geringfügigen Mengen bis zum letzten Abschnitt vordrang, während das Eisencitrat bereits bis zum dritten Abschnitt völlig festgelegt wurde.

Bei den Wasserauszügen der beiden Salze wurden nur sehr geringe Mengen der im ersten Abschnitt festgelegten Anteile extrahiert; wasserlösliches Eisencitrat wurde bis zum zweiten Abschnitt gefunden, Eisenchlorid dagegen wieder im letzten Abschnitt. Hier war die Hälfte des säurelöslichen Anteils wasserlöslich. Anders

verhielt sich das Eisenchelat. Mit dem $n/2$ HCl-Auszug wurden in jedem Abschnitt beachtliche Mengen Eisen erhalten, wobei der höchste Wert im fünften Abschnitt (20-30 cm) lag. Durch die Wasserauszüge konnten aus den ersten, zweiten und fünften Abschnitten, wo auch die größten Anteile säurelöslichen Eisens sich befanden, geringe Anteile an markiertem Eisen extrahiert werden.

Beim kalkreichen Boden Dachau (Abb. 4) ergaben die $n/2$ HCl-Auszüge bei allen drei Eisensalzen im ersten Abschnitt einen großen festgelegten Anteil, mit erniedrigten Werten bei Eisenchelat im Vergleich zu den anderen beiden Salzen. Während bei Eisenchlorid nur bis zum zweiten Abschnitt markiertes Eisen nachgewiesen werden konnte, wurden bei Eisencitrat und Eisenchelat bis zum letzten Abschnitt geringe Mengen gefunden, wobei beim Eisenchelat sich höhere Werte ergaben.

Wasserlösliches markiertes Eisen konnte nur im obersten Abschnitt einer einzigen Eisenchloridsäule in sehr geringen Mengen nachgewiesen werden.

Bei der Untersuchung des sauren Bodens Oldenburg (Abb. 5) zeigten die Auszüge mit $n/2$ HCl, daß in allen Abschnitten der mit Eisenchelat behandelten Säulen extrahierbare Anteile enthalten waren, wobei der fünfte Abschnitt den größten Anteil enthielt. Wasserlösliche Teile konnten nur im ersten und fünften Abschnitt festgestellt werden.

Bei Eisenchlorid und Eisencitrat wurde im HCl-Auszug der größte Anteil im ersten Abschnitt vorgefunden. Bei Eisenchlorid wurden bis zum dritten Abschnitt festgelegte Anteile nachgewiesen. Hingegen konnte bei Eisencitrat in der einen Säule bis zum zweiten Abschnitt und in der anderen Säule bis zum letzten Abschnitt markiertes Eisen nachgewiesen werden. Nur im ersten Abschnitt der Säulen dieser beiden Salze wurden geringste Mengen wasserlöslichen markierten Eisens gefunden.

Beim aufgekalkten Boden Oldenburg (Abb. 6) ergaben die $n/2$ HCl-Auszüge im ersten Abschnitt der mit Eisenchlorid und Eisencitrat behandelten Säulen den größten Teil der beiden Salze. Aber auch im zweiten Abschnitt konnten noch geringfügige festgelegte Anteile ermittelt werden. Weiterhin wurden in einer Säule der Eisenchloridbehandlung im fünften und sechsten Abschnitt und

BODEN DARMSTADT (KALKHALTIG)

Fe-CHLORID

1	2
66,6	0,108
0,51	-
0,052	-
0,053	-
0,035	-
90,83	0,052

9,007 im Si. W.
32,7 FIXIERT

Fe-CHELAT

1	2
64,4	0,135
0,58	-
0,06	-
0,031	-
0,056	-
0,15	0,084

0,0059 im Si. W.
34,7 FIXIERT

Fe-CITRAT

1	2
14,8	0,034
7,4	0,014
5,27	-
4,6	-
27,1	0,081
4,6	-

0,065 im Si. W.
39,2 FIXIERT

1	2
75,7	0,137
1,05	0,03
0,11	-
-	-
-	-
-	-

0,0043 im Si. W.
23,1 FIXIERT

1	2
66,9	0,150
1,2	0,015
0,043	-
-	-
-	-
-	-

0,007 im Si. W.
31,9 FIXIERT

ALLE WERTE SIND IN %ANGEGERN

1=HCl-AUSZUG 2=WASSERAUSZUG

Si. W.=SICKERWASSER

ABB.(3)

VERLAGERUNG VON ⁵⁹Fe IN DEN BODENSÄULEN

Fe-CHLORID

The figure consists of two diagrams, labeled 79.2 and 83.3, showing the distribution of shear flow q in a thin-walled open cross-section. The diagrams are oriented vertically, with the top flange at the top and the bottom flange at the bottom. The web is in the middle. The shear flow q is indicated by arrows and numerical values.

Diagram 79.2 (Left): The shear flow q is 0.0066 in. Si. W. The top flange has a shear flow of 0.18. The bottom flange has a shear flow of 0.18. The web has a shear flow of 0.18. The shear flow is directed downwards in the top flange, upwards in the bottom flange, and to the right in the web.

Diagram 83.3 (Right): The shear flow q is 0.0087 in. Si. W. The top flange has a shear flow of 0.20. The bottom flange has a shear flow of 0.20. The web has a shear flow of 0.20. The shear flow is directed downwards in the top flange, upwards in the bottom flange, and to the right in the web.

Fe-CHELAT

0.3 FIxIERT

1.0

0.92

1.08

1.5

0.65

0.03

0.073 m st. W.

2

0.3 FIxIERT

1

0.85

1.4

1.7

1.2

0.03

0.11 m st. W.

2

Fe-CITRAT

79.5 FIXIERT

0,003 km St. W.

1

2

17,2

9,26

9,04

0,13

0,04

2,07

75 FIXIERT

0,0075 km St. W.

1

2

19,6

9,16

9,13

0,13

1,01

2,4

ALLE WERTE SIND IN %ANGEGEBEN $\frac{1}{2}$ HCl - AUSZUG $\frac{1}{2}$ = WASSERAUSZUG S.I.W.-SICKERWASSER -

ABB(4)

VERLAGERUNG VON ^{59}Fe IN DEN BODENSÄULEN

BODEN OLDENBURG (SAUER)

Fe-CHLORID

Fe-CHELAT

Fe-CITRAT

Fe-CHLORID		Fe-CHELAT		Fe-CITRAT	
0,33 0,27	1	5,6 0,33	1	60,5 0,26	1
1,08 -	2	1,4 -	2	0,73 -	2
0,07 -	1	0,6 -	1	- -	1
- -	2	3,06 -	2	- -	2
0,09 -	1	0,83 -	1	0,046 -	1
- -	2	7,26 -	2	0,085 -	2
0,013 im St. W.	1	0,33 im St. W.	1	0,014 im St. W.	1
0,016 im St. W.	2	22,5 0,12	2	- -	2
35,5 FIXIERT	1	10,5 -	1	0,017 im St. W.	1
35,5 FIXIERT	2	39,5 0,14	2	0,12 -	2
45,0 FIXIERT	1	7,7 -	1	37,7 FIXIERT	1
45,0 FIXIERT	2	- -	2	37,7 FIXIERT	2

ALLE WERTE SIND IN % ANGEZEIGT

1 = 0,1 HCl-AUSZUG 2 = WASSERAUSZUG

St.W.=SICKERWASSER

ABB.(5)

VERLAGERUNG VON ⁵⁹Fe IN DEN BODENSÄULEN

BODEN OLDENBURG (NEUTRAL)

Fe-CHLORID		Fe-CHELAT		Fe-CITRAT	
59,8	-	62,8	-	60,1	-
2,2	-	1,3	-	1,3	-
-	-	-	-	0,022	-
-	-	0,4	-	-	-
1	-	7,9	-	7,4	-
2	-	2,9	-	1,7	-
-	-	-	-	0,6	-
-	-	43,2	-	44,3	-
-	-	1,7	-	1,2	-
0,017 im St. W.	0,013 im St. W.	0,047 im St. W.	0,06 im St. W.	0,01 im St. W.	0,01 im St. W.
37,5 FIXIERT	34,0 FIXIERT	35,5 FIXIERT	35,1 FIXIERT	30,6 FIXIERT	31,2 FIXIERT
ALLE WERTE SIND IN% ANGEGEBEN		1=2 HCl-AUSZUG \ 2=WASSERAUSZUG		St.W.=SICKERWASSER ¹	

ABB. (6)

VERLAGERUNG VON ⁵⁹Fe IN DEN BODENSÄULEN

in einer Säule der Eisencitratbehandlung im dritten Abschnitt ebenfalls geringfügige Anteile der beiden Salze festgelegt.

Das Eisenchelat verhielt sich in diesem Boden wieder wie bei den vorher besprochenen Böden, indem in allen sechs Abschnitten festgelegte Anteile festgestellt wurden, von denen der fünfte Abschnitt wieder den höchsten Wert besaß.

In diesem Boden konnte bei keinem Eisensalz ein wasserlöslicher Anteil nachgewiesen werden.

1.7. Diskussion der Bodenuntersuchungen.

Die vorangegangene Beschreibung der Verlagerung der drei Eisensalze in den Bodensäulen führt zu folgenden Ergebnissen:

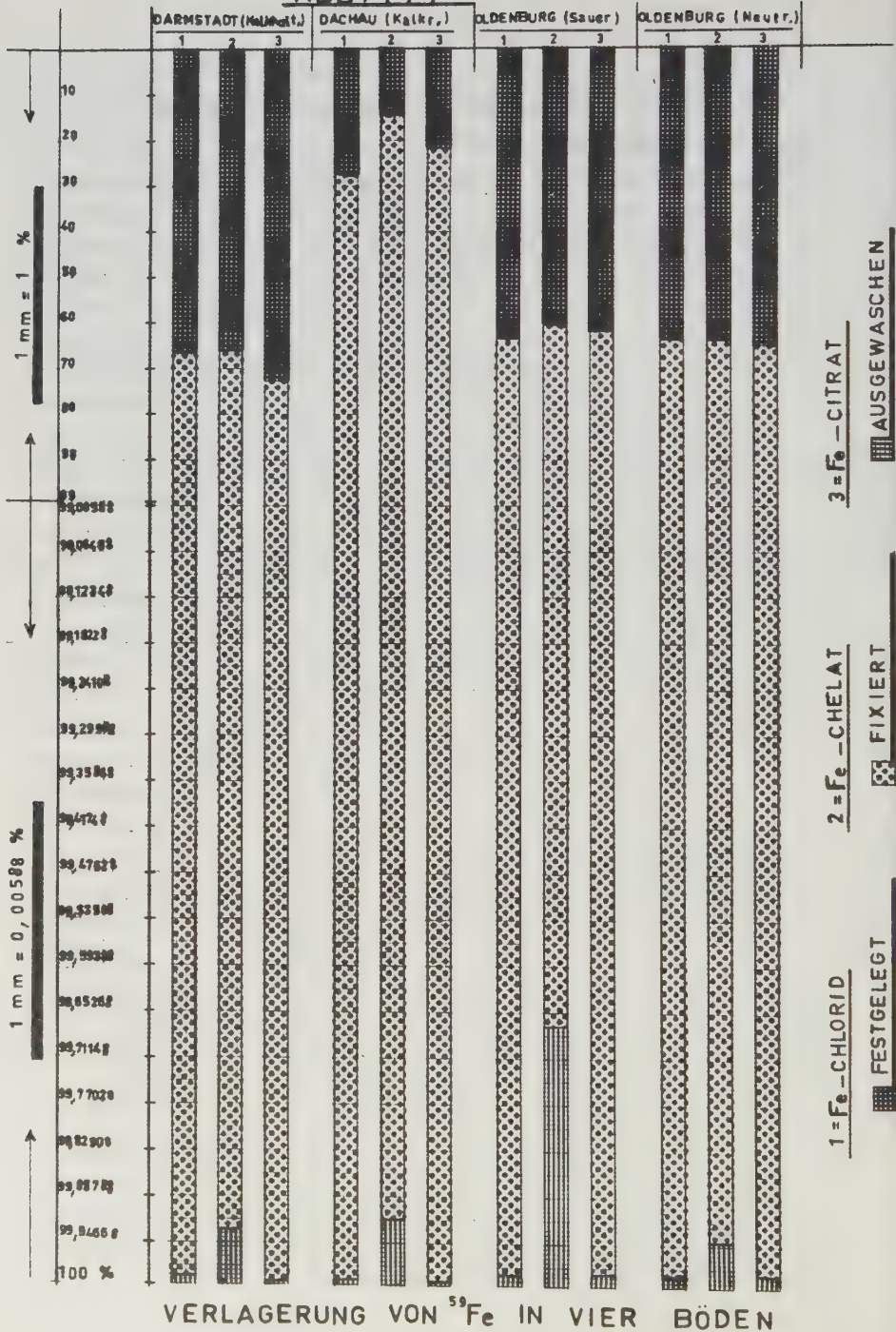
- a) Das Eisenchlorid wurde in allen Bodenarten zum größten Teil im ersten Abschnitt (3 cm Tiefe) festgelegt. Falls Teile dieses Salzes bis zum letzten Abschnitt verlagert werden, wie es beim Boden Darmstadt (kalkhaltig) und vielleicht bei Oldenburg neutral der Fall war, erscheinen die Mengen doch zu minimal, als daß sie für die Eisenversorgung der Pflanzen ausreichend sein könnten. Dieser Befund bestätigt die Meinung von STEWART und LEONARD (1952) über die Zwecklosigkeit der Anwendung anorganischer Eisensalze, da sie einen höheren Dissoziationsgrad besitzen, wodurch sich die Fe-Komponente von ihrem Partner schnell trennt und häufig als Hydroxyd oder Phosphat ausgefällt wird.
- b) Ganz anders verhielt sich das Eisenchelat. Bei allen vier Böden wurde es auf alle Säulenabschnitte verteilt unter besonderer Bevorzugung des fünften Abschnittes (20-30 cm Tiefe).
- c) Das Eisencitrat, eine einfache organische Verbindung zeigte seine Instabilität auf allen Böden. Hier ist, wie bei Eisenchlorid die Hauptmenge im ersten Abschnitt zu finden. Jedoch kam es vor, daß auch in einzelnen Säulen bis zum letzten Abschnitt, wie beim Boden Dachau und einer Säule des sauren Bodens Oldenburg, markiertes Eisen zu finden war. Diese Instabilität des Eisencitrates mag z.T. mit der Anfälligkeit dieser Verbindung gegenüber der Wirkung von Bodenmikroorganismen erklärt werden, was zur Trennung der beiden Komponenten des Salzes führt. Als Endprodukt liegt das Eisen in ausgefällten Formen vor.

1.8. Zusammenfassender Überblick der Ergebnisse des Auswaschungsversuches (Abb. 7).

- a) Es ist zu erkennen, daß in allen Böden, außer Dachau, 60-70% der drei Eisensalze festgelegt (mit $n/2$ HCl extrahierbar) wurden. Dies bedeutet, daß 30-40% des Eisens, unabhängig von der Eisenform, fixiert (mit $n/2$ HCl nicht extrahierbar) wurde. Beim Boden Dachau konnten von Eisenchlorid 27%, von Eisenchelat 14% und von Eisencitrat 21% mit $n/2$ HCl extrahiert werden. Der niedrige Wert an $n/2$ HCl-löslichem Eisenchelat kann dadurch erklärt werden, daß das stärker verlagerte Eisenchelat unter der Auswirkung des Kalkgehaltes jedes einzelnen Abschnittes lag, was die Fixierung dieser Verbindung erhöhte. In einem kalkreichen Boden, wie Dachau, muß also bei der Fe-Düngung auch mit Fe-Chelaten mit dem starken verdrängenden Einfluß des Calciums gerechnet werden.
- b) Die fast vollständige Festlegung des Eisens von Eisenchlorid und Eisencitrat in den obersten Bodenschichten dürfte sich unter praktischen Verhältnissen so auswirken, daß das Eisen in dieser Form nicht in den Wurzelbereich der zu düngenden Pflanzen gelangt. Anders beim Eisenchelat, weil diese Verbindung zu einem beträchtlichen Anteil bis zu 40 cm Tiefe verlagert wurde. Hierbei dürfte das Wurzelsystem der meisten Pflanzenarten mit dieser Eisenverbindung in Berührung kommen und es auszunutzen vermögen.
- c) Bei den Wasserauszügen konnten nur minimale Mengen der drei Salze in allen Böden extrahiert werden. Dies bedeutet, daß die verlagerten Anteile der drei Eisensalze in den einzelnen Bodenabschnitten zu schwer löslichen Formen umgesetzt wurden. Dennoch hat sich im Vergleich zu den beiden anderen Salzen das Eisenchelat als wirkungsvoller erwiesen, auf Grund der höheren Gehalte im Sickerwasser an ausgewaschenen radioaktiven Anteilen.

Trotz der hier gefundenen geringen wasserlöslichen Anteile sämtlicher Salze (auch Fe-EDTA), konnten viele Autoren mit Fe-Chelat Erfolge zur Bekämpfung der Eisenchlorose bei den verschiedensten Pflanzenarten, auf Böden mit ungünstigen

ABB. (7)



Eisenverhältnissen, erzielen.

Nach HILL-COTTINGHAM (1957) hängt die Stabilität solcher Verbindungen vom Tongehalt des Bodens, Typ des Tons und dem pH-Wert der Bodensuspension ab. Der Autor stellt die Mineralisierung der Chelatverbindungen in zwei Stufen dar:

- c.a) Die rapide Sorption eines bestimmten Teils der Chelatverbindung durch den Ton.
- c.b) Eine langsame Umtauschreaktion, wobei die löslichen Eisenchelate durch andere Metalle, wie Ca^{++} , ersetzt werden. WALLACE (1963) betrachtet das amphoterische Verhalten der Chelate als Grund zur Fixierung ihrer Metallkomponente durch die Entstehung einer Kationenaustauschreaktion. Weiterhin ist der Autor der Meinung, daß Ton und Lehm eine große Kapazität zur Chelatfixierung besitzen. Nach WALLACE (1955) kann die Stabilität solcher Verbindungen durch Kochen in CaCO_3 -Lösung geprüft werden. Die instabilen Chelate werden in diesem Fall schnell abgebaut und das Eisen fällt in Hydroxyd-oder Carbonat-Form aus.

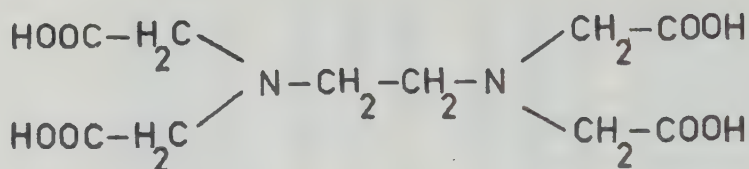
Diese noch weitgehend ungeklärte Frage der unterschiedlichen Stabilität verschiedener Chelatverbindungen führte zum zweiten Versuch über das Verhalten verschiedener Eisenchelatverbindungen im Boden.

2. Mineralisierungsversuch.

In diesem Versuch wurde die Mineralisierung der folgenden vier Chelatverbindungen in den gleichen vier Böden wie beim Auswaschungsversuch untersucht:

- I. Äthylendiamintetraessigsäure (EDTA)-Natriumsalz-Eisensalz (13% Fe)
- II. Eisen-Natriumsalz der Monooxäthylaminodiessigsäure (8,9% Fe)
- III. Eisen-Natriumsalz der Nitrilotriessigsäure (NTA) (10% Fe)
- IV. Eisen-Komplexsalz der Diäthanolaminoessigsäure (13,6% Fe)

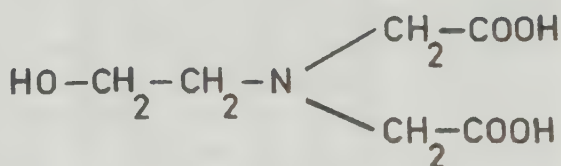
I



ÄTHYLENDIAMINTETRAESSIGSÄURE (EDTA)

STABIL.-KONST. = 25,1

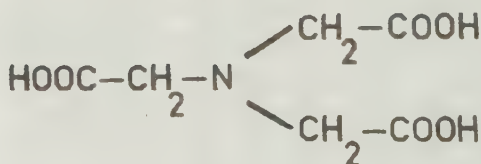
II



MONOOXÄTHYLAMINODIESSIGSÄURE

STABIL.-KONST. DER SALZE DIESER VERBINDUNG LIEGT IN DER GRÖSSEN ORDNUNG ZWISCHEN 7-10

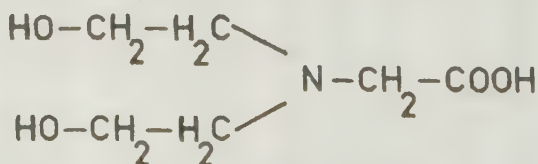
III



NITRILOTRIESSIGSÄURE (NTA)

STABIL.-KONST. = 8,2

IV



DIÄTHANOLAMINOESSIGSÄURE

STABIL.-KONST. = UNBEKANNT

2.1. Versuchsdurchführung.

a) Die Herstellung der markierten Lösungen der vier Fe-Chelatverbindungen.

Die radioaktiven Stammlösungen wurden hergestellt, indem zu je 10 ml der Lösung jeder Chelatverbindung, worin in jedem Fall 4 mg Fe enthalten waren, 5 μ ^{59}Fe zugefügt wurden. Am Anfang des Versuches (5.1.1966) ergaben die Messungen in 2 ml dieser Lösungen als Standardlösung die folgenden Impulszahlen:

Eisenchelat I.	226028 imp/min.
Eisenchelat II.	227066 imp/min.
Eisenchelat III.	229133 imp/min.
Eisenchelat IV.	228755 imp/min.

b) Die weitere Bearbeitung:

In je 8 Neubauerschalen aus Glas wurden von den einzelnen luftgetrockneten Böden je 400 g eingefüllt. Zu je 2 Schalen wurden 10 ml der verschiedenen markierten Fe-Chelat-Lösungen gegeben und gründlich gemischt. Danach wurden die Schalen auf 60% der max. Wasserkapazität gebracht und der Schaleninhalt nochmal intensiv gemischt. Die Schalen wurden dann mit Glasplatten abgedeckt. Durch die tägliche Ergänzung des verdunsteten Wassers wurden die Schalen während des ganzen Versuches auf 60% der max. Wasserkapazität gehalten, unter Berücksichtigung der bei den Zwischenuntersuchungen entnommenen Bodenmengen.

c) Die Extraktionsvorgänge.

c.a) Wasserauszug.

25 g getrocknete Böden, welche nach der Behandlung vom 5.1. 1966 250 μ Fe + 0,312 μ ^{59}Fe enthalten sollten, wurden mit 250 ml aqua dest. in 500 ml Stohmannkolben 5 Std. ausgeschüttelt und anschließend filtriert. 100 ml vom Filtrat wurden auf dem Wasserbad eingedampft und das organische Material des Rückstandes mit 5 ml konz. HNO_3 zerstört und die Säure abgedampft. Der zurückgebliebene Rückstand wurde in 4 ml n/2 HCl aufgelöst, wovon 2 ml zur Messung der Aktivität benötigt wurden.

c.b) Kombinierter Wasser- und n/2 HCl-Auszug.

Diese Behandlung wurde 25 Tage nach Versuchsbeginn durchgeführt und bestand aus zwei Stufen:

Der Wasserauszug, wie bereits beschrieben wurde, und der n/2 HCl-Auszug:

Der nicht eingedampfte Teil des Filtrats des Wasserauszuges wurde mit HCl so ergänzt, daß 250 ml n/2 HCl-Extraktionslösung entstanden. Darin befand sich auch das Filterpapier, mit dem vorher filtriert wurde. Danach folgte ein 5 stündiges Ausschütteln und Messung der Aktivität, wie bereits beim Wasserauszug beschrieben wurde.

Auch in diesem Fall mußte der Kalkgehalt der Böden Darmstadt und Dachau berücksichtigt werden, damit nach der Neutralisation ihres Kalkes noch ein Überschuß an n/2 HCl vorhanden war.

c.c) Doppel-Laktat-Auszug.

Außer mit Wasser und n/2 HCl wurden Extraktionen mit der Doppel-laktat-Lösung (RIEHM 1955) vorgenommen. Hierbei wurden 25 g lufttrockner Boden mit 250 ml Doppellaktat-Lösung (pH 3,6) 5 Stunden lang extrahiert. Die weitere Behandlung bis zur Messung der Aktivität erfolgte wie beim wässrigen Extrakt.

Extraktionen mit Wasser wurden am 10., 60., 86. und 116. Tag des Versuches vorgenommen, mit Wasser und n/2 HCl (kombinierter Auszug) am 25. Tag und mit Doppellaktat am 90., 120., 150. und 180. Tag.

2.2. Diskussion der Versuchsergebnisse.

Die Untersuchungen dieses Versuches führten zu den folgenden Ergebnissen:

- a) Die Wasserauszüge der vier Böden zeigten, daß die Verbindung Fe-EDTA, durch ihre länger anhaltende Wasserlöslichkeit, eine größere Stabilität aufwies, speziell im Boden Oldenburg sauer. Mit Erhöhung des pH-Wertes nahm die Stabilität ab, so daß im kalkreichen Boden Dachau nur sehr geringe wasserlösliche Anteile dieser Verbindung gefunden wurden. Das Fe-EDTA ist in diesem Umsetzungsversuch langsamer als im Auswaschungsversuch abgebaut worden. Die Ursache hierfür kann in der

250 $r_{Fe}/25g \text{ BODEN}$

ABB. (8)

MARKIERTES EISEN IM WASSER- AUSZUG.

180 ————— Fe- CHELAT I
160 ———— II
140 ———— III
120 — x — x — IV

BODEN "DARMSTADT"
(KALKHALTIG)

BODEN "DACHAU"
(KALKREICH)

10 60 86 116 10 60 86 116 TAGE

BODEN "OLDENBURG"
(SAUER)

BODEN "OLDENBURG"
(NEUTRAL)

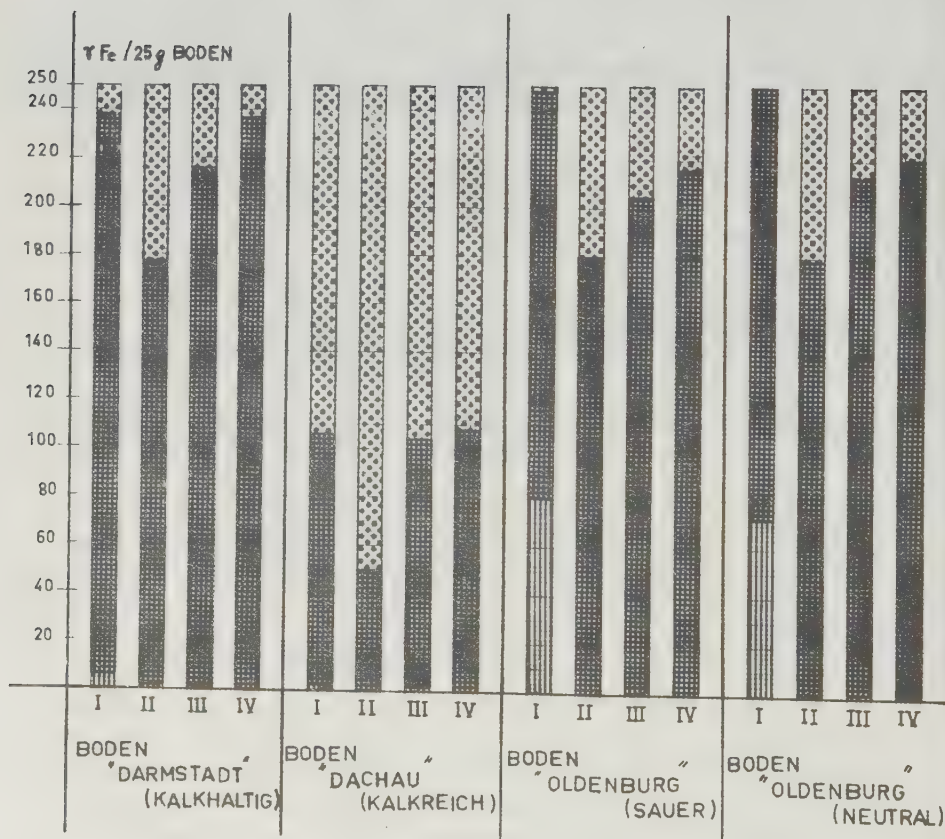
250
240
220
200
180
160
140
120
100
80
60
40
20

10 60 86 116

10 60 86 116

ABB.(9)

LÖSLICHKEIT DES CHELAT-EISENS IN WASSER
UND $n/2$ HCL AM 25. VERSUCHSTAG.



I, II, III und IV = Fe -CHELATE

|||| WASSERLÖSLICH.

■ MIT $n/2$ HCL EXTRAHIER- ■ MIT $n/2$ HCL NICHT
BAR. EXTRAHIERBAR.

250
240
 $r_{Fe}/25g \text{ BODEN}$

ABB. (10)

MARKIERTES EISEN IM DOPPEL- LAKTATAUSZUG.

Fe — CHELAT I
" II
" III
" IV

BODEN "DARMSTADT"
(KALKHALTIG)

BODEN "DACHAU"
(KALKREICH)

90 120 150 180

90 120 150 180 TAGE

BODEN "OLDENBURG"
(SAUER)

BODEN "OLDENBURG"
(NEUTRAL)

250
240
220
200
180
160
140
120
100
80
60
40
20
90 120 150 180

250
240
220
200
180
160
140
120
100
80
60
40
20
90 120 150 180

Tab. 8

Markiertes Eisen im Wasserauszug am 10. Versuchstag.
(γ Fe je 25 g Boden)

Böden	Fe-ChelatI		Fe-ChelatII		Fe-ChelatIII		Fe-ChelatIV	
	a	b	a	b	a	b	a	b
Darmstadt (kalkh.)	16,3 15,85	15,4	0,96 0,96	0,96	1,76 1,76	1,76	0,65 0,41	0,18
Dachau (kalkr.)	2,6 2,6	2,6	0,7 0,7	0,71	1,8 1,98	2,16	1,6 1,55	1,5
Oldenburg (sauer)	185,0 183,5	182,0	1,04 0,96	0,88	3,4 3,22	3,04	1,3 1,47	1,65
Oldenburg (neutral)	146,0 146,0	146,0	0,96 1,04	1,12	2,6 2,78	2,96	1,12 1,21	1,30

Tab. 9

Markiertes Eisen im Wasserauszug am 25. Versuchstag.
(γ Fe je 25 g Boden)

Böden	Fe-ChelatI		Fe-ChelatII		Fe-ChelatIII		Fe-ChelatIV	
	a	b	a	b	a	b	a	b
Darmstadt (kalkh.)	8,4 5,9	3,4	- 0,6	1,2	0,08 0,04	-	- -	-
Dachau (kalkr.)	2,5 2,25	2,0	0,56 0,44	0,32	0,4 0,8	1,2	0,3 0,15	-
Oldenburg (sauer)	78,6 80,3	82,0	0,24 0,42	0,6	1,4 1,45	1,5	0,48 0,24	-
Oldenburg (neutral)	71,5 72,0	72,5	0,23 0,235	0,24	1,76 1,52	1,28	0,3 0,47	0,64

Tab. 10

Markiertes Eisen im Wasserauszug am 60. Versuchstag.

(γ Fe je 25 g Boden)

Böden	Fe-ChelatI		Fe-ChelatII		Fe-ChelatIII		Fe-ChelatIV	
	a	b	a	b	a	b	a	b
Darmstadt (kalkh.)	15,2 17,2	19,2	-	-	0,75 0,6	0,45	-	-
Dachau (kalkr.)	-	-	-	-	0,67 0,59	0,52	-	-
Oldenburg (sauer)	81,6 83,2	84,8	-	-	2,8 1,92	1,04	-	0,96 0,48
Oldenburg (neutral)	84,8 80,4	76,0	-	-	1,4 2,0	2,6	0,6 0,3	-

Tab. 11

Markiertes Eisen im Wasserauszug am 86. Versuchstag.

(γ Fe je 25 g Boden)

Böden	Fe-ChelatI		Fe-ChelatII		Fe-ChelatIII		Fe-ChelatIV	
	a	b	a	b	a	b	a	b
Darmstadt (kalkh.)	-	-	-	-	-	-	-	-
Dachau (kalkr.)	-	-	-	-	-	-	-	-
Oldenburg (sauer)	60,8 56,8	52,8	-	-	1,5 1,27	1,04	-	-
Oldenburg (neutral)	34,4 35,2	36,0	-	-	1,2 1,03	0,86	-	-

Tab. 12

Markiertes Eisen im Wasserauszug am 116. Versuchstag.

(γ Fe je 25 g Boden)

Böden	Fe-ChelatI		Fe-ChelatII		Fe-ChelatIII		Fe-ChelatIV	
	a	b	a	b	a	b	a	b
Darmstadt (kalkh.)	-	-	-	-	-	-	-	-
Dachau (kalkr.)	-	-	-	-	-	-	-	-
Oldenburg (sauer)	18,7	22,0	-	-	-	-	-	-
	20,3		-	-	-	-	-	-
Oldenburg (neutral)	-	-	-	-	-	-	-	-
	-		-		-		-	

Tab. 13

Markiertes Eisen im n/2 HCl-Auszug am 25. Versuchstag.

(γ Fe je 25 g Boden)

Böden	Fe-ChelatI		Fe-ChelatII		Fe-ChelatIII		Fe-ChelatIV	
	a	b	a	b	a	b	a	b
Darmstadt (kalkh.)	232,0	232,0	176,0	178,0	216,0	216,0	242,0	232,0
	232,0		177,0		216,0		237,0	
Dachau (kalkr.)	104,0	104,0	49,6	48,3	112,0	96,0	112,0	104,0
	104,0		48,9		104,0		108,0	
Oldenburg (sauer)	168,0	168,0	168,0	192,0	208,0	200,0	208,0	224,0
	168,0		180,0		204,0		216,0	
Oldenburg (neutral)	164,0	176,0	161,0	176,0	212,0	212,0	224,0	216,0
	180,0		170,5		212,0		220,0	

Tab. 14

Markiertes Eisen im Doppellaktat-Auszug am 90. Versuchstag.

(γ Fe je 25 g Boden)

Böden	Fe-ChelatI		Fe-ChelatII		Fe-ChelatIII		Fe-ChelatIV	
	a	b	a	b	a	b	a	b
Darmstadt (kalkh.)	29,2	22,8	11,2	9,6	20,0	19,2	9,6	8,8
	26,0		10,4		19,6		9,2	
Dachau (kalkr.)	3,9	4,5	0,9	1,2	2,96	2,3	1,9	3,1
	4,2		1,05		2,63		2,5	
Oldenburg (sauer)	128,0	136,0	24,8	25,0	36,0	33,6	31,5	32,8
	132,0		24,9		34,8		32,1	
Oldenburg (neutral)	96,0	112,0	27,1	28,8	35,6	35,2	28,6	29,5
	104,0		27,9		35,4		29,0	

Tab. 15

Markiertes Eisen im Doppellaktat-Auszug am 120. Versuchstag.

(γ Fe je 25 g Boden)

Böden	Fe-ChelatI		Fe-ChelatII		Fe-ChelatIII		Fe-ChelatIV	
	a	b	a	b	a	b	a	b
Darmstadt (kalkh.)	25,7	24,7	10,5	7,0	16,2	19,2	5,2	5,0
	25,2		8,75		17,7		5,1	
Dachau (kalkr.)	-	-	-	-	3,9	3,3	0,96	1,5
	-		-		3,6		1,23	
Oldenburg (sauer)	120,6	126,3	23,9	23,6	43,5	40,8	27,2	29,6
	123,4		23,7		42,1		28,4	
Oldenburg (neutral)	79,2	79,2	23,8	22,5	34,0	34,6	17,0	10,3
	79,2		23,1		34,3		13,6	

Tab. 16

Markiertes Eisen im Doppellaktat-Auszug am 150. Versuchstag.

($\uparrow$ Fe je 25 g Boden)

Böden	Fe-ChelatI		Fe-ChelatII		Fe-ChelatIII		Fe-ChelatIV	
	a	b	a	b	a	b	a	b
Darmstadt (kalkh.)	14,6 13,7	12,8	7,6 8,0	8,4	11,8 11,2	10,6	3,4 3,15	2,9
Dachau (kalkr.)	- -	-	- -	-	- -	-	- -	-
Oldenburg (sauer)	90,0 84,4	78,9	24,0 24,7	25,4	31,8 32,2	32,6	20,4 20,0	19,6
Oldenburg (neutral)	46,4 43,0	39,7	17,2 14,6	12,0	24,0 22,7	21,5	8,0 7,65	7,3

Tab. 17

Markiertes Eisen im Doppellaktat-Auszug am 180. Versuchstag.

($\uparrow$ Fe je 25 g Boden)

Böden	Fe-ChelatI		Fe-ChelatII		Fe-ChelatIII		Fe-ChelatIV	
	a	b	a	b	a	b	a	b
Darmstadt (kalkh.)	7,0 6,2	5,4	- -	-	4,8 4,7	4,6	- -	-
Dachau (kalkr.)	- -	-	- -	-	- -	-	- -	-
Oldenburg (sauer)	25,8 26,9	28,0	4,7 3,95	3,2	4,0 4,5	5,0	3,0 2,65	2,3
Oldenburg (neutral)	10,7 9,1	7,5	1,4 1,65	1,9	2,6 2,4	2,2	1,1 1,0	0,95

unterschiedlichen Befeuchtung beider Versuche liegen. Die Böden des ersten Versuches wurden dauernd mit ihrer maximalen Wasserkapazität angereichert, was eine schnellere Hydrolyse dieser Verbindung förderte, während die Böden des zweiten Versuches nur mit 60% ihrer maximalen Wasserkapazität befeuchtet waren.

Obwohl die Nitritotriessigsäure eine viel geringere Stabilität als EDTA zeigte, war sie doch wesentlich höher im Vergleich zu den übrigen beiden Verbindungen.

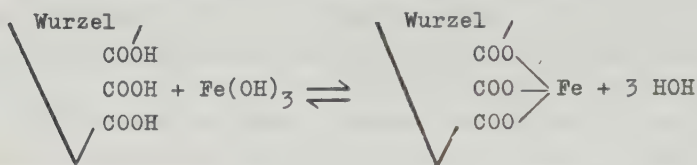
Weiterhin zeigten die Wasserauszüge, daß alle Chelatverbindungen im Laufe der Zeit zersetzt werden und nicht mehr wasserlöslich sind.

- b) Bei der zweiten Behandlung (Wasser- und $n/2$ HCl-Auszüge nach 25 Tagen) wies die Verbindung EDTA ebenfalls die höchste Stabilität auf, die wiederum mit Erhöhung des pH-Wertes abnahm. Hierbei werden die fixierten Anteile (in $n/2$ HCl nicht löslich) erhöht.
- c) Die Doppel-Laktat-Lösung konnte auf Grund ihrer höheren Azidität (pH 3,6) im Vergleich zu den Wasserauszügen erheblich größere Mengen Fe extrahieren, wobei die Chelatverbindung EDTA die günstigste Löslichkeit zeigte. Auch die Doppellaktat-Auszüge zeigten, daß alle Chelatverbindungen im Laufe der Zeit zersetzt und nicht mehr durch sie extrahierbar waren.

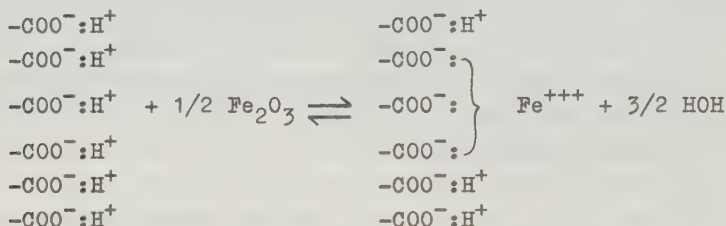
Die wichtigsten Ergebnisse der beiden beschriebenen Versuche sind:

- a) Die Anwendung von Fe-Chlorid und Eisencitrat verspricht keinen Erfolg bei der Eisenversorgung der Pflanze.
- b) Trotz der höheren Stabilität der Eisenchelatverbindungen werden ihre löslichen Anteile im Laufe der Zeit verringert. Daraus ergibt sich die Frage, ob und wie die Pflanzen aus den vorhandenen unlöslichen Eisenformen ihren Bedarf decken können. Die Literatur gibt folgende Erklärungen:
 - b.a) Die Chelatverbindungen, die durch die Wurzeln und die in der Wurzelzone lebenden Mikroorganismen ausgeschieden werden, ermöglichen es, die Pflanzen mit löslichen aufnehmbaren Eisenformen zu versorgen.

- b.b) Die hohe Azidität der Wurzelzone führt zur Löslichkeit der ausgefällten Eisenformen.
- b.c) Die direkte Berührung zwischen der Wurzeloberfläche mit ihrer Schleimzone und den kolloidalen Eisenhydroxyd- und Oxydteilchen und mit dem austauschbaren Eisen auf der Tonoberfläche, führt zu folgenden Reaktionen:



(Nach GRUNER und JENNY 1960)



(Nach JENNY 1965)

Nach den Gleichungen ist nun das Eisen Bestandteil des Wurzelsystems geworden und steht somit für die Eisenversorgung der Pflanze zur Verfügung.

BRANTON und JACOBSON (1960) weisen darauf hin, daß bei den verschiedenen biologischen pH-Werten, trotz ihrer Auswirkungen auf die Löslichkeit des Eisens, manche Pflanzen gesund wachsen. Sie vermuten, daß eine mögliche Aufnahme von unlöslichem Eisen in kolloidaler Form oder Fe(OH)_3 vorkommen kann. In den meisten Fällen hat die Eisenzufuhr deutliche Erfolge zur Beseitigung des Eisenmangels, auch in verschiedenen Bodenarten mit ungünstigen Ernährungsverhältnissen, gebracht. Trotzdem betrachten BROWN und Mitarbeiter (1959) die Eisenzufuhr nicht als absolute Lösung zur richtigen Eisenernährung. Die Autoren sind der Meinung, daß die ungünstige Bodenbeschaffenheit nicht nur die Eisenaufnahme hemmt, sondern das Eisen in der Pflanze inaktiviert.

Die Unfähigkeit der anorganischen Fe-Salze, die Eisenmangelschäden zu beheben, führte in den letzten Jahren zu der meist erfolgreichen Anwendung der synthetischen Eisenchelatverbindungen. Neben den Erfolgen in der Eisenernährung, speziell in kalkreichen Böden, konnten in anderen Fällen die Auswirkung anderer Mikroelemente auf die Eisenernährung verhindern (HOLMES und BROWN 1955).

Bisher wurde der Einfluß des Bodens mit seinem heterogenen System auf die Eisenformen und die Eisendüngung behandelt. Aber nicht nur vom Boden ist die Eisenernährung abhängig. Vielmehr sind zahlreiche Faktoren, die für die Verfügbarkeit des Eisens im Nährmedium und seine Funktion in der Pflanze bestimmend sind, an der Ausbildung des Ertrages beteiligt. Irgendeine Störung in diesem System kann dazu führen, daß das Eisen nicht in der Lage ist, sich an den physiologischen und biochemischen Prozessen der Pflanze zu beteiligen. Als Folge davon zeigen die Pflanzen die typischen Eisenchlorosesymptome.

Solche Symptome äußern sich im Gegensatz zum Mg-Mangel immer zuerst an den jüngsten Blättern. Vielfach wird die Nervatur in ihren Einzelheiten als grüne Streifen auf dem hellgrünen bis gelben Untergrund des Blattes ersichtlich. Auch bei Obstbäumen äußert sich der Fe-Mangel in dieser Weise. Bei Gramineen sieht man häufig überhaupt keine Blattadern mehr. Die befallenen Blätter erscheinen bei leichterem Mangel hellgrün, bei starkem Mangel gelb bis weißlich. Häufig ähnelt der Fe-Mangel dem Manganmangel. Beim Manganmangel bleiben aber die Hauptadern und die Äderchen der chlorotischen Blätter grün, bei der Fe-Chlorose nur die Hauptadern. So ist verständlich, daß der Chlorophyllgehalt deutlich mit der Intensität des Mangels korreliert. Leichte Eisenmangelschäden lassen sich durch eine Eisendüngung relativ schnell beheben. Dagegen kann bei fortgeschrittenem Mangel das gesamte System der Zelle schon so gestört sein, daß eine Fe-Düngung wirkungslos bleibt.

C Die Rolle des Eisens als Pflanzennährstoff.

C.A Der Einfluß des Eisens auf Wachstum und Entwicklung der Pflanzen.

I Literaturüberblick.

1. Faktoren, die die Eisenernährung der Pflanzen beeinflussen.

1.1. Äußere Faktoren.

Solche Faktoren sind relativ wenig untersucht. Scheinbar haben sie keinen großen Einfluß auf die Eisenaufnahme durch die Pflanzen, trotz ihres bedeutenden Einflusses auf die Eisenformen und Eisendüngung im Boden. Temperatur und Tageslicht erweisen sich als wichtigste äußere Faktoren.

a) Temperatur.

Nach SARIC und MUND (1963) wachsen einige Pflanzen manchmal unter ungünstigeren Temperaturen, als für ein normales Wachstum dieser Pflanzen erforderlich wäre. Als Beispiel dafür sind die Frühlingspflanzen zu nennen, welche in einer Jahreszeit wachsen, wo es häufig zu schädlichen niedrigen Temperaturen kommt. Die niedrige Temperatur beeinträchtigt das Wachstum der jungen Pflanzen sehr. Diese Pflanzen unterscheiden sich in ihrer Reaktion mit der Außentemperatur in Bezug auf die Eisenaufnahme. Z.B. fanden die beiden Autoren den höchsten Eisengehalt der oberirdischen Teile der Maispflanzen bei einer Temperatur zwischen 20-30°C. Bei niedriger Temperatur sank der Eisengehalt ab. Andererseits wurde der Eisengehalt der Maiswurzeln sehr minimal von der Temperatur beeinflusst. Darüber hinaus geben die beiden Autoren an, daß der höchste Eisengehalt der monokotylen-Pflanzen bei einer Temperatur von 30°C zu finden ist. Bei den dikotylen-Pflanzen liegt der höchste Eisengehalt zwischen 5-20°C und sinkt bei weiterer Temperaturerhöhung ab. Die genannten Autoren meinen, daß im allgemeinen das Eisen am stärksten bei hoher Temperatur, und wenig bei niedrigen Temperaturen aufgenommen wird. RIEKELS und LINGLE (1966) fanden ein Absinken in der ⁵⁹Fe-Aufnahme bei weiterer Eisenzufuhr und Temperaturerhöhung. Darüber hinaus zeigten die Tomatenpflanzen bei höherer

Temperatur Eisenchlorose-Symptome, wahrscheinlich auf Grund der Inaktivierung des Fe in der Pflanze durch andere Nährstoffe, wie P und Mn. Manche Autoren fanden einen niedrigen Eisengehalt im Pflanzengewebe bei hohen Temperaturen.

Diese nicht einheitlichen Befunde können vielleicht durch unterschiedliche experimentielle Bedingungen und die unterschiedlich hohe Fe-Zufuhr erklärt werden. Ein wesentlicher Einfluß der Transpirationsrate der Pflanzen bei den verschiedenen Temperaturen auf die Eisenaufnahme konnte bis jetzt nicht festgestellt werden.

b) Tageslicht.

Es ist bekannt, daß die Chlorophyllbildung sehr stark von der Lichtintensität abhängig ist. Die Abhängigkeit der Chlorophyllkonzentration vom Eisenzustand der Pflanze erklärt teilweise die direkte oder indirekte Relation zwischen der Lichtintensität und der Eisenaufnahme. Nach INGALLS und SHIVE (1931) beeinflusst die Lichtintensität vom Tag zur Nacht den löslichen Fe-Gehalt der Blätter der Pflanze. Weiterhin fanden die letztgenannten Autoren einen Einfluß der Lichtintensität auf die H-Ionenkonzentration im Blattsaft verschiedener Pflanzen, was den pH-Wert bzw. die Eisenformen der Blätter ebenso beeinflussen mag.

HILL-COTTINGHAM und LLOYD (1961) stellten einen Abbau der Fe-Chelatverbindungen in den Blättern durch das Tageslicht fest. Diese abgebauten Fe-Chelate umfassen sowohl die zugeführten synthetischen, als auch die nativen Chelatoren in den Blättern. Als Beweis dafür gilt der Befund der genannten Autoren, daß von den Pflanzen aufgenommenes, in den Blättern befindliches Fe-EDTA im Tageslicht zersetzt wurde.

1.2. Faktoren, die sich aus dem Nährmedium ergeben.

Das Nährmedium der Pflanzen besteht aus einem gewissen Faktorenkomplex, welcher das Wachstum dieser Pflanzen hauptsächlich bestimmt. Die intensiven Untersuchungen zahlreicher Autoren mit Hilfe von Boden- und Wasserkultur-Versuchen führen zu folgenden Ursachen, welche die Eisenaufnahme beeinträchtigen und zur Fe-Mangelchlorose führen können.

a) pH-Wert des Nährmediums.

Das Zusammenwirken der einzelnen Bestandteile des Nährmediums bildet ein Milieu mit einem bestimmten pH-Wert. Der Eisenzustand dieses Milieus läßt sich von dem pH-Wert, wegen des aktiven Valenzwechsels bzw. der leichten Ausfällbarkeit des Eisens, stark beeinflussen. Nach OERTLI und JACOBSON (1960) besitzt das Fe(II) eine höhere Stabilität gegen Ausfällung in der Wasserkultur als das Fe(III). Trotzdem ist das Fe(II) in der Nährlösung und in Anwesenheit von niedrigen Sauerstoffkonzentrationen thermodynamisch stabil. Beim normalen O_2 -Druck der Atmosphäre ist das Fe(III), speziell in sauren Lösungen stabil. Andererseits zeigt das Fe(II) bei höheren pH-Werten ebenso große Stabilität. Durch weitere Steigerung des pH-Wertes werden auch die Fe(II)-Salze ausgefällt.

Die Untersuchungen von EDWIN und Mitarbeitern (1960) befaßten sich mit den unterschiedlichen Reaktionen der verschiedenen Pflanzenarten gegenüber dem pH-Wert des Nährmediums. Sorghum-Pflanzen (Sorghum vulgar. var. Double Dwarf 38) gaben ein gesundes Wachstum in Sandkulturen bei einem pH-Wert von 8,0-9,5. Dieselben Pflanzen zeigten die typischen Eisenchlorose-Symptome, wenn sie in Wasserkulturen bei pH 5,0-6,5 wuchsen. Diese chlorotischen Pflanzen wurden einer 10 ppm Fe in EDDHA-Form enthaltenden Nährlösung zugeführt. Danach verschwand die Eisenmangelchlorose, als Beweis für eine nicht ausreichende Fe-Konzentration in der Nährlösung am Anfang des Versuches. Andererseits fanden REDISKE und BIDDULPH (1953) einen Anstieg in der Eisenaufnahme bei einer Steigerung der H-Ionenkonzentration (niedrigerer pH-Wert); auch die adsorbierte Eisenmenge an der Wurzeloberfläche wurde erhöht.

Der Einfluß der hohen pH-Werte auf die Eisenformen bzw. die Eisenaufnahme beschäftigte viele Autoren. Sowohl die anorganischen Eisensalze als auch teilweise die Eisenchelatverbindungen werden durch die höheren pH-Werte unwirksam gemacht. Nach SIMON und Mitarbeitern (1963) ist die Wirkung der schwachen Fe-Chelatverbindungen, wie Fe-NTA (Fe-Nitrilotriessigsäure) bei hohem pH-Wert viel langsamer als der Fe-Chelatverbindungen mit höheren Stabilitätskonstanten. Darüber hinaus geben die Autoren an, daß

die Chlorophyllsynthese der Blätter von Sojabohnen-Pflanzen, die in einer Nährlösung bei pH 5,8 wuchsen, wesentlich schneller verlief als bei pH 7,0.

b) Einfluß des Mangans.

Das Mangan ist einer der wichtigsten Nährstoffe, die mit der Eisenaufnahme bzw. der Eisenfunktion in der Pflanze verbunden sind. Das antagonistische Verhältnis zwischen Eisen und Mangan erklärt teilweise die Ursache der Eisenchlorose bei Pflanzen mit hohem Mn-Gehalt und den Manganmangel bei Pflanzen, die mit Fe angereichert sind. Eine hohe Mn/Fe-Relation des Nährmediums begünstigt den Fe-Mangel. Offenbar ist das Mn imstande, nicht allein durch seine konkurrierende Wirkung die Aufnahme, sondern auch die enzymatische Wirksamkeit des Fe zu hemmen. Es ist wahrscheinlich, daß auch in der Pflanze beide Metalle um gleiche Bindungsstellen konkurrieren, so daß bei einer starken Mn-Ernährung vom Mn Bindungsstellen belegt werden, die für einen normalen Ablauf des physiologischen Geschehens vom Fe abgesättigt werden müßten. Umgekehrt kann auch das Fe, wenn es in größeren Mengen in der Pflanze vorkommt, sich an spezifische Mn-Enzyme binden.

Die frühere Annahme, ein Fe-Mangel sei gleichbedeutend mit einer Mn-Toxizität und umgekehrt, der Mn-Mangel stelle eine Fe-Toxizität dar, DEKOCK und Mitarbeiter (1960), trifft nach den neueren Untersuchungen nicht zu (VLAMIS und WILLIAMS 1964). Vielmehr sind die einzelnen Schadbilder unterschiedlich; Fe-Mangel beginnt mit einer ziemlich gleichmäßigen Aufhellung der jüngsten Blätter, Mn-Toxizität dagegen beginnt mit chlorotischen Flecken in den älteren Blättern; bei Mn-Mangel werden die Blätter zwischen den Adern aufgehellt, bei Fe-Toxizität zeigen die gesamten Blätter einen erhöhten Pigmentgehalt. DEKOCK und INKSON (1962) vermuten, daß die Mn-Toxizität bei einer bestimmten äquivalentischen Relation von Mn zu Fe in der Pflanze eintritt.

AGARWALA und Mitarbeiter (1964) konnten jedoch auch bei niedriger Mn-Konzentration leichte Eisenchlorose-Symptome auf Gerstenpflanzen feststellen. Weiterhin fanden die Autoren auf den Eisenmangelpflanzen der Gerste dunkelbraune Nekrosen zwischen den Blattadern, als Folge der schädlichen Wirkung hoher aufge-

nommener Mn-Mengen. Später verbreiten sich diese Nekrosen auch auf die Stengelknoten. Darüber hinaus beeinflusste das Mn die Katalase- und Peroxydase-Aktivität. Nach VIELEMEYER und Mitarbeitern (1966) führt der Eisenmangel zu einem Absinken der Peroxydase- und Katalaseaktivität, Mn-Mangel aber zu einem Anstieg der Peroxydaseaktivität und Mn-Überschuß zu einem Anstieg der Peroxydaseaktivität und einem Abfall der Katalaseaktivität. Andererseits fanden WEINSTEIN und ROBBINS (1955) ein Absinken in der Katalase- und Cytochromoxydaseaktivität in grünen und Albino-Blattgeweben von Sonnenblumenpflanzen, die entweder bei niedriger Fe-Konzentration oder bei höheren Mn-Gaben wuchsen. Weiterhin erklären die beiden Autoren die bei hoher Mn-Versorgung verursachte Eisenchlorose als Ergebnis des Ersatzes von H- oder Fe-Atome durch das Mangan in Porphyrin-Molekülen. Nach AGARWALA und Mitarbeitern (1964) erniedrigt der Eisenmangel den Gehalt an Chlorophyll, Katalase und Peroxydase schneller, als es der Mn-Mangel tut. Das Absinken im Chlorophyll-, Katalase- und Peroxydase-Gehalt bei niedriger Eisenzufuhr kann durch die gehemmte Synthese des Chlorophylls und der Häm-Teilchen der Katalase und Peroxydase entstehen, solcher Verbindungen, die von der Eisenzufuhr und nicht von dem in den Pflanzen-Geweben vorhandenen Eisen abhängig sind. Die Erniedrigung im Chlorophyll- und Katalase-Gehalt bei Mn-Mangel ist ein Beweis für den Einfluß des Mn auf die Chlorophyllsynthese und das Häm. Darüber hinaus geben die letztgenannten Autoren an, daß die Chlorophyll-Katalase-Depression bei starker Mn-Zufuhr als Ergebnis des Ersatzes von Mg und von Fe durch das Mn im Porphyrin-System erklärt werden kann.

BENNET (1945) meint, daß Mn das Fe in der Pflanze inaktiviert. Das hohe Redox-Potential des Mangans führt manchmal zur Fe(II)-Oxydation. Das Fe^{+++} ist physiologisch inaktiv im Vergleich zum Fe^{++} . Weiterhin wird manchmal das Mn^{+++} in der Pflanze zum Mn^{++} reduziert. Dies läßt vermuten, daß ein Redox-System die Relation zwischen den beiden Elementen beherrscht.

c) Einfluß des Phosphors.

Viele Autoren führen die Eisenchlorose bei verschiedenen Pflanzenarten auf den P-Gehalt der Nährlösung bzw. der chlorotischen Gewebe zurück. Weiterhin wurde oft ein höherer P-Gehalt in chlorotischen Pflanzen als in normalen gefunden. DEKOCK (1955) erklärt diese Erscheinung mit der Immobilisation des Eisens nach der Bildung von unlöslichem Eisenphosphat in der Pflanze. Nach REDISKE und BIDDULPH (1953) verringert die hohe P-Konzentration der Nährlösung die Aufnahme und die Absorption des Eisens durch die Pflanze. DEKOCK und Mitarbeiter (1960) halten die P/Fe-Relation für wichtiger zur Erklärung der Eisenchlorose als nur den Fe-Gehalt der Pflanze. Darüber hinaus gab DEKOCK (1955) an, daß hohe P-Konzentrationen zur Eisenchlorose oder zur Phosphor-Toxizität führen, während die meisten Pflanzen bei hoher Fe-Konzentration P-Mangelerscheinungen zeigen oder das Eisen toxisch wirkt. In den Untersuchungen von BROWN und Mitarbeitern (1955) entwickelten die Reispflanzen bei höheren P-Konzentrationen Eisenchlorose-Symptome in der Wasserkultur. Trotzdem konnten diese chlorotischen Pflanzen durch Zufuhr größerer Mengen Eisen geheilt werden. Andererseits gaben die Gerstenpflanzen gesundes Wachstum bei höherer P-Konzentration. Die Eisenzufuhr zu diesen Pflanzen führte zu Schadbildern. Nach CHRUSLOVA (1966) werden Eisenverbindungen bei höherer P-Konzentration bereits in der Nährlösung, sowie in der Pflanze selbst ausgefällt. Möglicherweise entstehen in der Wurzel organische Fe-P-Verbindungen, was zu einer Erschwerung der Fe-Translokation in der Pflanze führen kann. Erhöhung des P-Gehaltes der Nährlösung führt zur Erhöhung des Gehaltes der Pflanzen an anorganischen Phosphaten. Die Wechselbeziehungen zwischen Fe und P sind also noch nicht völlig geklärt. HOLMES (1960) stellte einen hohen P-Gehalt in den jungen Blättern im Vergleich zu den älteren Blättern fest. Auf Grund dieses Befundes vermutete der Autor, daß der Phosphor in der Pflanze beweglicher sei als das Eisen was sich bei der Bildung neuer Pflanzenteile auswirken kann. Weiterhin wird das P von den älteren zu den neu gebildeten Blättern transloziert, zur gleichen Zeit, wo die Eisenkonzentration in den älteren Blättern erhöht wurde. Die Wirkung des P in Bezug auf die Eisenernährung hängt vom pH-Wert der

Nährlösung ab. Bei Verwendung von Fe-EDTA als Fe-Quelle treten die genannten Auswirkungen hoher P-Gaben in wesentlich geringerem Ausmaß auf.

d) Das Zusammenwirken verschiedener Ionen.

Die Eisenaufnahme und der Eisentransport in der Pflanze werden häufig durch die konkurrierende Wirkung anderer Nährstoffe gehemmt. Der Befund von MILLER und Mitarbeitern (1960), daß der pH-Wert allein in Abwesenheit von HCO_3^- -Ionen keine großen Wirkungen ausüben kann, regte das Interesse zahlreicher Autoren an, die Wirkung solcher Ionen auf die Eisenaufnahme zu erklären. Die Hydrolyse von im Boden vorhandenen CaCO_3 führt unter bestimmten Bedingungen zur Entstehung der HCO_3^- -Gefahr. Die Autoren haben Versuche mit Hilfe der "Split-root"-Technik zur Erklärung der Rolle der HCO_3^- -Ionen in der Eisenaufnahme durchgeführt. In dieser Technik wurde das Wurzelwerk der Sojabohnenpflanzen in zwei Teile geteilt. Ein Teil wuchs in HCO_3^- -haltiger Nährlösung und der andere in eisenhaltigem Boden. Dabei wurden das Eisen aus dem Boden und die HCO_3^- -Ionen aus der Nährlösung aufgenommen. Die wachsenden Pflanzen zeigten keine Eisenchlorose. Diese Untersuchung stellt die Wichtigkeit des gleichzeitigen Vorliegens des Fe und der HCO_3^- -Ionen im Boden zur Erzeugung der Eisenchlorose dar. In Quarzsand wachsende, mit FeSO_4 -haltiger Nährlösung ernährte Hirse- und Erbsenpflanzen zeigten bei Zusatz von CaCO_3 zum Quarzsand eine wesentliche Herabsetzung der Fe-Aufnahme (OSTROVSKAJA und OVCARENKO 1966).

Nach LINDSAY und THORNE (1954) verringert die hohe HCO_3^- -Konzentration einer Nährlösung den Chlorophyllgehalt und das Trockengewicht der Bohnenpflanzen, auch bei günstiger Belüftung. Weiterhin hemmen die HCO_3^- -Ionen die Eisenbeweglichkeit zum Stengel und den Blättern durch Akkumulation des Eisens in der Wurzel. Auch das Calcium beteiligt sich mit anderen Nährstoffen in der Beeinflussung der Eisenaufnahme. Neben der Wichtigkeit des Calciums für das Pflanzenwachstum wird die Eisenaufnahme abnehmen, wenn die Ca-Konzentration der Nährlösung ansteigt (BROWN und Mitarbeiter 1960). Nach DEKOCK und INKSON (1962) beeinflusst auch das Verhältnis K/Ca die Eisenaufnahme. DEKOCK und Mitarbeiter (1960) fanden eine hohe K/Ca-Relation

in den chlorotischen Blättern von Senfpflanzen. Andererseits betrachten BROWN und Mitarbeiter (1959) den hohen K-Gehalt und die hohe K/Ca-Relation in den chlorotischen Blättern als Ergebnis der Eisenchlorose und nicht als Ursache, die zur Eisenchlorose führt. Weiterhin fand BENNET (1945), daß die chlorotischen Blätter höhere K-Konzentrationen akkumulierten. Solche K-Konzentrationen sind in manchen Fällen mehrmals höher als in normalen grünen Blättern. Der Autor erklärt diesen Befund als Ergebnis des niedrigen Ca-Gehaltes der chlorotischen Blätter. Trotzdem enthielten grüne Blätter, im Gegensatz zu dieser Feststellung, einen höheren K-Gehalt im Vergleich zu den chlorotischen. Nach BOLLE-JONES (1955) wird die Wirksamkeit des Eisens innerhalb der Pflanze durch das Kalium erhöht. Darüber hinaus hängt die Translokation des K vom Fe-Zustand der Pflanze ab. Eine Verstärkung der K-Zufuhr führt zur Erhöhung der Eisenkonzentration der Knollen und Blätter, zu einer Depression im P-Gehalt und einer Zunahme der Chlorophyllbildung der Kartoffelblätter. Der verbessernde Einfluß des K auf die Fe-Mangel-Chlorose kann durch die Beseitigung der schädlichen Wirkung des P auf die Löslichkeit der Fe-Formen in den Blättern erklärt werden. In diesem Fall steht mehr Eisen für die Chlorophyllbildung zur Verfügung. Die Erhöhung der Eisenausnutzung in der Pflanze durch das K kann nicht nur auf die verringerte P-Konzentration der Blätter, sondern auch auf die verringerte hemmende Wirkung des P auf die Fe-Mobilisation in den Blättern zurückgeführt werden. Der Eisengehalt der Wurzeln von Kartoffelpflanzen steigt mit der Erhöhung von K-Gaben an.

Die Untersuchungen von BOLLE-JONES (1956) veranschaulichen auch die Bedeutung der K/Fe-Relation für die Blütenbildung. Bei zunehmender Versorgung mit Eisen vermindert sich die Anzahl der pro Pflanze gebildeten Blüten. Diese Wirkung des Eisens wurde bei einer verstärkten Kali-Anwendung deutlich. Bei einem geringen Zusatz von Eisen wurde die Blütenbildung durch steigende Kaliversorgung vermehrt.

Weitere Untersuchungen stellten einen Einfluß des Kupfers auf die Eisenernährung fest. Nach BROWN und Mitarbeitern (1960) führte die Anreicherung von Kupfer in den Citruspflanzen zur

Hemmung der Eisenaufnahme, und die Pflanzen zeigen Eisenmangelchlorose. Weiterhin verringerte die Zufuhr vom Cu zum Boden die Absorption und Translokation des Eisens bei Maispflanzen (BROWN 1967). DEKOCK und INKSON (1962) sind der Meinung, daß das Cu in seinem Verhalten in den Pflanzenblättern dem Mn ähnelt. Die Autoren halten zur Erklärung der Eisenchlorose das Verhältnis $Cu+Mn/Fe$ für wichtiger als Mn/Fe (BROWN und Mitarbeiter 1955). BROWN und HOLMES (1956) stellten eine Relation zwischen Cu und P zur Entstehung der Eisenchlorose bei Sojabohnenpflanzen fest. In den Untersuchungen von OSTROVSKAJA und OVCARENKO (1966) trat in den oberirdischen Teilen der Erbsenkeimlinge bei pH 5,0 und 7,5 in Gegenwart von Cu oder Mo eine Verringerung im Fe-Gehalt auf. Nach KIRSCH und Mitarbeitern (1960) akkumuliert sich das Mo in den Wurzeln der Tomatenpflanzen bei niedriger Fe-Zufuhr und umgekehrt. Weiterhin führt die Mo-Zufuhr bei niedrigen Fe-Gaben zu niedrigerem Ertrag. Bei höheren Fe-Konzentrationen erzeugt die Mo-Zufuhr einen hohen Ertrag.

Die Untersuchungen von LINGLE und Mitarbeitern (1963) stellten eine Störung in der Mobilisation des Fe zur Pflanzenspitze durch Zink fest. Nach WALLACE (1964) verursacht das Nickel in manchen Pflanzenarten die Eisenchlorose. Darüber hinaus fanden HOLLEY und CAIN (1955) eine Störung in der Eisenfunktion der Pflanze durch hohe Konzentrationen von Nickel und Kobalt. DEKOCK und MITCHELL (1957) stellten Eisenchlorose an Senfpflanzen durch die starke Aufnahme von Ni und Cu fest. Diese Chlorose konnte nach der Anwendung von Fe-EDTA oder von Chelatverbindungen der beiden behoben werden.

1.3. Andere Faktoren.

Neben den schon genannten Faktoren, die die Eisenernährung beeinflussen, trifft man in vielen Fällen weitere Merkmale, die mit der Eisenernährung gekoppelt sind. Zum Beispiel unterscheiden sich die verschiedenen Pflanzenarten in ihrer Eisenbedürftigkeit. Das größte Eisenbedürfnis zeigt der Reis, ein etwas geringeres Mais und Weizen, denen sich in größerem Abstand der Hafer und die Gerste und endlich der Roggen anschließen. Von geprüften Leguminosen war die Erbse wesentlich eisenbedürftiger als die Ackerbohne (SCHROPP 1938). Nach den Untersuchungen

von BROWN (1967) zeigten die beiden Mais-Genotypen (ys,/ys und Pa54) verschiedene Kapazitäten zur Eisenaufnahme aus demselben Boden. Die ys,/ys-Mutation entwickelte schneller Eisenchlorosesymptome als die Pa 54-Pflanzen. Weiterhin stellte man fest, daß HA-Sojabohnenpflanzen größere Eisenmengen aufnehmen können als die PI-Sojabohnen. Deswegen sind die PI-Pflanzen für die Eisenchlorose anfälliger als die HA-Pflanzen, wenn keine ausreichende Eisenkonzentration zur Verfügung gestellt wird. Es wird vermutet, daß die PI-Pflanzen nicht in der Lage sind, das Fe^{+++} zu Fe^{++} zu reduzieren und durch Chelatisierungsreaktionen verfügbar zu machen (BROWN 1963). RIEKELS und LINGLE (1966) sind der Meinung, daß der Sättigungsgrad der Pflanzengewebe mit Eisen ein wichtiger Faktor sein kann, welcher die Translokation und die Aufnahme des Eisens reguliert. Bei niedrigem Sättigungsgrad nimmt die Eisenaufnahme zu.

Nach BROWN und JACOBSON (1962) beeinflußt die Stoffwechselaktivität der Wurzelzellen die Eisenernährung.

Darüber hinaus kann die Eisenchlorose auf virologische oder pathologische Ursachen zurückgeführt werden (DEKOCK 1955).

Diese besprochenen Faktoren und wahrscheinlich noch weitere unbekannte stellen die Ursachen dar, die zur Eisenmangelchlorose führen. Mit ihr gehen beträchtliche Störungen der physiologischen und biochemischen Funktionen der Pflanzen einher.

2. Einfluß der Eisenmangel-Chlorose auf das Pflanzenwachstum.

2.1. Einfluß auf die Relation aktives Fe/inaktives Fe.

Die Untersuchungen von DRIEL (1965) wiesen einen hohen Fe-Gehalt in den chlorotischen Blättern der Tomatenpflanzen im Vergleich zu den grünen nach. Darüber hinaus gab BENNET (1945) an, daß das meiste Fe in den chlorotischen Blättern "inaktives Eisen" war, welches nicht in der Lage war, sich an der Chlorophyllbildung zu beteiligen. Der Autor bezeichnet "inaktiv" auch mit "residual", d.h. "übriges Eisen". Nach ELGALA (1964) wird ein Teil vom inaktiven Eisen für die Zellstruktur (Chloroplastenbildung) der Pflanze ausgenutzt. Die Relation aktives Eisen

(mit verdünnter HCl extrahierbar) zum inaktiven Eisen (mit verdünnter HCl nicht extrahierbar) in der Pflanze kann durch weitere Eisenzufuhr erhöht werden.

2.2. Einfluß auf die Chlorophyll-Synthese.

Trotz der Gegenmeinung von BRANTON und JACOBSON (1962), daß eine Relation zwischen dem gesamten Eisen und dem Chlorophyllgehalt der Blätter besteht, einigen sich zahlreiche Autoren in der Meinung, daß das Eisen als Co-Faktor für den Aufbau des Chlorophylls (magnesiumhaltiges Porphyrin) unentbehrlich ist. Andererseits hängt die Chlorophyllbildung vom Fe/Mg-Verhältnis ab (OERTLI und JACOBSON 1960). Nach DEKOCK und Mitarbeitern (1960) wurde eine Steigerung im Chlorophyllgehalt der chlorotischen Blätter nach der Eisenzufuhr festgestellt. Außerdem beeinflussen die verschiedenen Eisengaben die Hämatinbildung. Das Hämatin geht in den hellgrünen Blättern schneller verloren als das Chlorophyll. Im allgemeinen enthalten die grünen Blätter höhere Hämatin-Konzentrationen als die chlorotischen. In den Untersuchungen von KELLER und KOCH (1964) verminderte der Eisenmangel die Bildung von Chlorophyll und anderen Pigmenten. Nach der Eisenzufuhr stieg die Pigmentbildung wesentlich rascher an als der Eisengehalt der Pflanzengewebe. Die Untersuchungen von AGARWALA und SHARMA (1961) zeigten ebenfalls eine positive Relation zwischen der Fe-Zufuhr und der Chlorophyllbildung. Das zugeführte Eisen beeinflusst die Porphyrinsynthese, die als Akzeptor für das Eisen im Chlorophyllaufbau funktioniert. Nach MARSH und Mitarbeitern (1963) besteht ein Verhältnis zwischen dem Häm und dem Chlorophyll in den Blättern der Pflanzen. Das Protoporphyrin ist eine Vorstufe zur Häm- und Chlorophyllbildung. Das Häm ist das Ferro-Protoporphyrin. SHETTY und MILLER (1966) fanden in den chlorotischen Blättern eine Depression im Gehalt an Chlorophyll a und b und an Karotinoiden. Diese Pigmente vermitteln die Umwandlung der Lichtenergie in chemische Energie. Weiterhin geben die Autoren an, daß die Chloroplasten-Struktur durch den Eisenmangel gestört wird.

2.3. Einfluß auf die Enzym-Aktivität.

Das Eisen ist der Baustein der Enzyme der Porphyrin-Synthese. Eisenmangel führt zu einer Depression im Gehalt der chlorotischen Pflanzen an diesen Verbindungen. Nach AGARWALA und Mitarbeitern (1965) entsteht eine solche Depression durch die Hemmung der Chlorophyllbildung in den chlorotischen Blättern. Durch die Eisenzufuhr zu den chlorotischen Pflanzen kann die verringerte Katalase- und Peroxydase-Aktivität erhöht werden. Die Enzymaktivität in den Eisenmangelblättern von Tabakpflanzen normalisiert sich 3-4 Tage nach der Eisenzufuhr (SHETTY und MILLER 1966). Die Untersuchungen von AGARWALA und SHARMA (1961) stellten ebenfalls eine positive Relation zwischen der Eisenzufuhr und der Katalaseaktivität der Blätter von Gerstpflanzen fest. Eine ähnliche Relation zwischen der Eisenzufuhr und der Peroxydaseaktivität fanden DEKOCK und Mitarbeiter (1960). Die Erhöhung in der Eisenkonzentration einer Nährlösung von 0,1 bis 0,5 ppm verursachte eine Steigerung in der Peroxydasekonzentration von etwa 40%. Eine weitere Erhöhung in der Eisenkonzentration führte zu geringerer Peroxydasebildung. Darüber hinaus wird die Akonitaseaktivität, die als Regulator für die γ -Aminolävulinsäure-Bildung funktioniert, in den Eisenmangelpflanzen verringert (MARSH und Mitarbeiter 1963). Die Anwendung von FeSO_4 als Eisenquelle erhöhte die Enzymaktivität mehr als Fe-EDTA (DRIEL 1964).

2.4. Einfluß auf die Protein-Synthese.

Die Störung im Porphyrinaufbau durch Eisenmangel bzw. in der Chlorophyll- und Chloroplastenbildung beeinträchtigt die Proteinsynthese. Die Untersuchungen von PERUR und Mitarbeitern (1961) stellten eine Absenkung von etwa 25% im Proteingehalt in den chlorotischen Blättern der Maispflanzen im Vergleich zu den normalen fest. SHETTY und MILLER (1966) sind der Meinung, daß das Eisen die Synthese von verschiedenen spezifischen Proteinen reguliert. Weiterhin erhöht die Eisenzufuhr den Proteingehalt der Chloroplasten und des Cytoplasmas der chlorotischen Tabakblätter. Die Autoren führen die Depression im Proteingehalt der chlorotischen Pflanzen entweder auf die niedrigen

Synthese-Raten der Proteine oder auf ihre Degradation zurück.

In den Untersuchungen von WELKIE und MILLER (1960) wurden in einer eisenfreien Nährlösung, worin Tabakpflanzen wuchsen, gelbe Pigmente entdeckt. Durch physikalische und chemische Nachweise stellte man fest, daß diese gelben Pigmente aus Riboflavin bestanden. Es ist bekannt, daß die höheren Pflanzen unter normalen Wachstumsverhältnissen Riboflavin als prosthetische Gruppe verschiedener Flavoprotein-Enzyme synthetisieren. Das Eisen beeinflußt die Funktion des Riboflavins. Die Riboflavinkonzentration einer Fe-Mangelnährlösung steigt im Laufe der Zeit bis zu einer bestimmten Konzentration an. Nach Zugabe von Eisen zu einer Fe-Mangelnährlösung nimmt die Riboflavinkonzentration dieser Lösung stark ab und das Wachstum der Tabakpflanzen beachtlich zu. Zur Bestätigung der Hypothese, daß die Eisenmangelgewebe Riboflavin ausscheiden, wenn der Riboflavingehalt der Blätter zu hoch ist, wurden normale und Eisenmangel-Blattgewebe gesammelt, in welchen das freie Riboflavin, Flavinmonophosphonukleotid (FMN) und Flavinadenindinukleotid (FAD) bestimmt wurde. Die FAD-Konzentration der chlorotischen Blätter war niedriger als in den normalen. Andererseits enthielten die chlorotischen Blätter Riboflavin (FMN + freies Riboflavin) in höherer Konzentration, im Vergleich zu den Blättern der Pflanzen, die in Fe-freier Nährlösung wuchsen. Im allgemeinen enthielten die chlorotischen Blätter eine höhere FMN + freie Riboflavin-Konzentration als die normalen. Das Verschwinden des Riboflavins in der Fe-Mangelnährlösung nach der Eisenzufuhr kann vielleicht durch eine Reabsorption dieser Verbindung durch die Wurzeln erklärt werden.

Weitere Zusammenhänge zwischen dem Fe und der Protein-Synthese werden im letzten Teil dieser Arbeit behandelt.

2.5. Einfluß auf die Kohlenhydrat-Synthese.

Selbstverständlich weist die Hemmung der Chlorophyllsynthese beim Eisenmangel zumindest auf eine Störung des Kohlenhydrat-Aufbaues hin. ILJIN (1951) fand bei vielen Pflanzenarten einen höheren Kohlenhydrat-Gehalt in den chlorotischen Blättern als in den normalen. Der Autor erklärt diesen Befund durch die

Speicherung der Kohlenhydraten in den Früchten und den Speicherorganen der normalen Pflanzen, im Gegensatz zu den chlorotischen Pflanzen, die keine Früchte und Speicherorgane bilden und deshalb die Kohlenhydrate in ihren chlorotischen Blättern speichern. BAR-AKIVA (1961) hat diesem Befund widersprochen. Der Autor stellte eine Verringerung des Zuckergehaltes der chlorotischen Blätter von Citrus-Pflanzen fest.

Im allgemeinen hemmt der Eisenmangel die meisten physiologischen und biochemischen Prozesse des Pflanzensystems, und im Laufe der Zeit gehen die chlorotischen Pflanzen ein. Unter solchen Bedingungen sinken die Erträge der Kulturpflanzen sehr stark ab. Die Beseitigung der Eisenchlorose bildet deshalb ein sehr wichtiges Problem der Pflanzenernährung. Die vielseitigen Zusammenhänge gestalten das Problem besonders schwierig.

3. Verfahren zur Heilung der Eisenchlorose.

Die erforderliche Eisenkonzentration für ein gesundes Pflanzenwachstum wird von den schon erwähnten Faktoren bestimmt. Die Erhöhung der Löslichkeit, bzw. Verfügbarkeit des Eisens durch die Verbesserung der Beschaffenheit des Nährmediums, oder die Anwendung von geeigneten Düngemitteln haben sich in den letzten Jahren als sehr nützliche Verfahren gegen den Eisenmangel erwiesen. Zunächst werden positive Schritte zur Behandlung dieses Problems vorgeschlagen:

- a) Richtige Pflege des Bodens durch Änderung seiner physikalischen Eigenschaften, wie Bewässerung, Entwässerung, Feuchtigkeit, Bindigkeit und Belüftung, macht die Behandlungsverfahren gegen den Eisenmangel wirksamer.
- b) Für jede Pflanzenart müssen die geeigneten Bodenverhältnisse für ihr optimales Wachstum ermöglicht werden. Jede Pflanzenart hat ihre spezifische Eisenkonzentration, um eine optimale Chlorophyllbildung bzw. einen guten Ertrag zu erzielen (OERTLI und JACOBSON 1960).
- c) Die Erhöhung des Gehaltes an organischen Substanzen im Boden führt zur Erhöhung der Löslichkeit, bzw. der Aufnehmbarkeit des in ihm vorhandenen Eisens. Dies kann durch die Vermischung der Pflanzenrückstände, speziell von Legumino-

- sen, wie Klee und Bohnen, mit dem Boden erreicht werden.
- d) Die Beseitigung der Schädwirkungen des Kalkes auf kalkreichen Böden durch Säuren (wie Schwefelsäure) oder saure Salze (wie Sulfate) ist eine weitere Möglichkeit, die Eisenchlorose bei verschiedenen Pflanzenarten zu beheben. Durch solche Verfahren wird die Löslichkeit des Eisens erhöht. Zahlreiche Autoren sind der Meinung, daß die Anwendung von Chelatverbindungen als geeignetstes Verfahren für diesen Zweck anzusehen ist.
- e) Die Regelung des pH-Wertes der verschiedenen Böden unter Berücksichtigung ihrer Nährstoffbilanz erleichtert den schwierigen Weg in der Eisernährung. Nach BRANDENBURG (1963) besteht die praktische Bekämpfung der "Säureschäden" vor allem in einer Normalisierung des Kalk- und Wasserhaushaltes des Bodens. Die Eisenchlorose durch hohe Bodenalkalität kann durch Erniedrigung des pH-Wertes beseitigt werden. Die Änderung des pH-Wertes im Boden mit dem Zweck die Löslichkeit des Eisens zu erhöhen, verursacht häufig eine Störung in der Ionenbilanz dieses Bodens. In diesem Fall tritt die konkurrierende Wirkung anderer Ionen bei der Eisenaufnahme auf. Sowohl bei niedrigen pH-Werten, als auch bei höheren, haben sich zahlreiche Chelatverbindungen als sehr geeignet zur Behebung der Eisenchlorose erwiesen.
- f) In Wirklichkeit gibt es keine spezifische Maßnahme zur Vermeidung der konkurrierenden Wirkung anderer Ionen. Häufig erzeugen die Maßnahmen gegen die konkurrierende Wirkung eines Ions (Nährstoffs) die Gefahr der konkurrierenden Wirkung anderer Ionen. Die mehrseitigen Zusammenhänge zwischen dem Zustand der Nährstoffe bzw. des Eisens und den anderen Umgebungsfaktoren machen es besonders schwer, die Nährstoffbilanz des Nährmediums für eine richtige Eisernährung zu regulieren. Im allgemeinen handelt es sich beim Eisenmangel um eine für das Pflanzenwachstum nicht ausreichende Konzentration an löslichem, bzw. an aufnehmbarem Eisen. Eine solche niedrige Konzentration kommt entweder als eine natürliche Eigenschaft des Nährmediums (des Bodens) vor, oder durch die schon besprochenen Einflüsse, die die erforderliche Ei-

senaufnahme durch die Pflanzen hemmen. Unter solchen Bedingungen zeigen die Pflanzen dann die Eisenmangelchlorose.

- g) Die Eisenzufuhr zu den chlorotischen Pflanzen hat sich in den letzten Jahren als ein erfolgreiches Verfahren zur Bekämpfung der Eisenchlorose erwiesen. ILJIN (1953) konnte die Heilwirkung auf die jungen Blätter der chlorotischen Pflanzen feststellen. Der Autor ist der Meinung, daß die jungen Blätter völlig und schneller ergrünen als die älteren. Nach SIMON und Mitarbeitern (1963) kann die Heilwirkung der Eisenzufuhr auf den chlorotischen Pflanzen bereits nach 24-48 Std. beobachtet werden.

Der Einfluß der Eisenzufuhr auf den Eisengehalt beschäftigte einige Autoren. Ihre Meinung, daß die chlorotischen Pflanzen mehr Eisen als die normalen akkumulierten, konnte von AGARWALA und SHARMA (1961) nicht bestätigt werden. Ähnliche Befunde erhoben die gleichen Autoren erneut im Jahre 1965. Sie trafen eine nur unbedeutende Relation zwischen Eisenzufuhr und Eisengehalt in den chlorotischen Teilen der Maispflanzen an.

Die Form des zugeführten Eisens spielt in der Ernährung dieses Elementes eine bedeutende Rolle. Nach SCHROPP (1938) "konnte bezüglich der Form der Eisenzufuhr ermittelt werden, daß die organischen Verbindungen des Eisens gegenüber den anorganischen Eisensalzen den Vorzug besitzen, den Einflüssen der Reaktion der Nährlösung weniger stark unterworfen zu sein. In besonders hohem Maße war diese Unabhängigkeit bei organischen Eisenverbindungen komplexer Natur, vor allem dem löslichen Eisenphosphat (Dinatriumphosphat), Eisencitrat und dem Eisenglyzerinphosphat festzustellen."

Die Eisenform hat einen großen Einfluß auf die Absorption und Adsorption dieses Elementes durch die Pflanzenwurzeln (REDISKE und BIDDULPH 1953).

Nach Meinung von WEINSTEIN und Mitarbeitern (1954) können die Pflanzen ihren Eisenbedarf durch Behandlung mit FeSO_4 (speziell bei pH 7,0) nicht decken. Andererseits fällt das Eisen bei der Anwendung von FeSO_4 in der Wasserkultur in Form von $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n \text{H}_2\text{O}$ aus. Trotzdem bleibt diese Eisenform aufnehmbar durch die Pflan-

zen (DRIEL 1964). SIMON und Mitarbeiter (1963) stellten bei der Anwendung von organischen Fe-Formen einen höheren Eisen-gehalt in den Wurzeln fest, als für normales Wachstum und richtige Chlorophyllbildung erforderlich war. Die Untersuchungen von DEKOCK und Mitarbeitern (1960) zeigten die Abhängigkeit des Wachstums, Farbe und Mineralzusammensetzung der Senfpflanzen von der Form des zugeführten Eisens. Sowohl die Eisenformen, organische oder anorganische, als auch die Wertigkeit des zugeführten Eisens bestimmen, in welchem Grade die Pflanzen das zugeführte Eisen für ihr Wachstum ausnützen können. Nach AGARWALA und Mitarbeitern (1964) haben die meisten Eisen-Porphyrinsysteme der Pflanzen die Funktion, das Fe^{+++} zu Fe^{++} zu reduzieren. Dies bedeutet aber nicht, daß die Hauptfunktion der Eisen-Porphyrinsysteme nur die Ausnutzung von Fe^{+++} darstelle. Wenn man annimmt, daß nur das Fe^{++} das physiologische aktive Eisen ist, muß es in der Pflanze ein Aktivierungssystem geben, welches das Fe^{+++} zu Fe^{++} für das Pflanzenwachstum reduzieren kann. Sonst könnten die Pflanzen den größten Teil des aufgenommenen Fe^{+++} für ihr Wachstum nicht ausnutzen, wenn dieses Aktivierungssystem abwesend wäre.

Die wichtigsten Methoden der Eisenzufuhr sind:

- a) Blattdüngung, durch bestimmte Sprüh-oder Spritzverfahren.
 - b) Bodendüngung.
- a) Die Spritzung hat sich nach der Meinung von HOLMES und BROWN (1955) als ungeeignet erwiesen. Durch ein solches Verfahren würden nur die gespritzten Flecken grün. Bei dieser Methode würde das Eisen nicht zu den jungen bzw. chlorotischen Blättern weiter transportiert. Die Spaltöffnungen scheinen bei der Eisenabsorption nach Spritzung eine große Rolle zu spielen (EDDINGS und BROWN 1967). Die beiden Autoren fanden, daß die am Tag behandelten Pflanzen mehr Fe absorbierten als die Pflanzen der Nachtbehandlung. Häufig werden die Pflanzen mit Lösungen gespritzt, die Regulatoren, Pflanzenschutzmittel und Nährstoffe enthalten. Solche Applikationen kommen nur zur Wirkung, wenn die gespritzten Verbindungen ins Blatt eintreten können. Die Kutikula spielt dabei eine wichtige

Rolle. EDDINGS und BROWN (1967) nennen als wichtigste Faktoren, die die Eisenaufnahme aus den gespritzten Lösungen bestimmen:

- a.a) Das Applikationsverfahren.
- a.b) Die Fähigkeit des gespritzten Eisens ins Blatt einzutreten (Zahlreiche Autoren halten das Eisen für ein schwer bewegliches Element in der Pflanze).
- a.c) Die Zusammensetzung der Spritzlösung.
- a.d) Die Reaktion zwischen der Spritzlösung und der behandelten Fläche (Bildung oder Ausfällung von neuen Verbindungen).
- a.e) Die Eigenschaften der behandelten Pflanzenart.
- a.f) Die Meßverfahren, mit denen die Wirksamkeit bzw. die Aufnahme des gespritzten Eisens gemessen wird.

In ihren Untersuchungen stellten die beiden Autoren fest, daß das gespritzte Eisen vom behandelten Blatt zu den neu gebildeten Blättern und zu den meristematischen Geweben transportiert wurde.

WALLACE (1957) hat Bohnenpflanzen mit ^{59}Fe - ^{15}N -EDTA-haltiger Lösung (25 ppm Fe) gespritzt. Drei Wochen nach der letzten Behandlung wurden die Pflanzen mit sehr verdünnter Säure zur Reinigung gewaschen. Aus der Aktivitätsmessung von ^{59}Fe und ^{15}N (Maß für die Verteilung der EDTA-Komponente) stellte der Autor unterschiedliche $^{59}\text{Fe}/^{15}\text{N}$ -Verhältnisse in den verschiedenen Pflanzenteilen fest. Als Erklärung dafür vermutet er, daß das Fe von der Fe-EDTA-Verbindung im Tageslicht getrennt wurde und die beiden Komponenten dieser Verbindung in verschiedenen Konzentrationen ins Blatt eingetreten sind. Am erfolgreichsten war die Spritzung mit aus Ascorbinsäure stammenden Fe-Chelaten. Nach OSTROVSKAJA und OVCARENKO (1966) nahm der Chlorophyllgehalt der Blätter von Ölrosen-Pflanzen gegenüber den Kontrollen bei Besprühen mit Fe-Diäthylentriaminpentaessigsäure (FeI) plus Zitronensäure stärker zu, als mit Besprühen von FeI , $\text{FeI} + \text{H}_2\text{SO}_4$ oder Fe-Citrat.

Die Untersuchungen von BROWN und Mitarbeitern (1965) in Kansas und Texas zeigten, daß durch dreimalige Bespritzung mit FeSO_4 -Lösung Sorghumpflanzen den höchsten Ertrag erbrachten.

Dies läßt vermuten, daß das Eisen nach der ersten Spritzung nur zur Beseitigung der Eisenchlorose von der Pflanze ausgenutzt wurde. Nach den weiteren Spritzungen beteiligt sich das neu gespritzte Eisen an der Bildung von neuen Pflanzengewebe bzw. weiterem Pflanzenwachstum.

- b) Die Einbringung des Eisendüngemittels in den Boden ist bei landwirtschaftlichen Kulturpflanzen die am meisten angewandte Methode zur Bekämpfung des Eisenmangels. Hierbei kommt das zugeführte Eisen mit den Wurzeln in Kontakt. Die Eisendüngemittel, sowohl die organischen als auch die anorganischen müssen die Fähigkeit haben, die Löslichkeit bzw. die Aufnehmbarkeit des Eisens im Boden zu erhöhen und die Pflanzen für ein richtiges Wachstum mit ausreichenden Fe-Mengen zu versorgen. Andererseits dürfen solche Düngemittel die Nährstoffbilanz des Bodens nicht stören. Wie schon erwähnt, versagen oft die anorganischen Eisensalze bei der Beseitigung des Eisenmangels. Die erfolgreiche Anwendung organischer Verbindungen, speziell der Chelate, ermöglicht es in vielen Fällen, die Probleme der Eisenernährung zu überwinden. Die verbreitete Anwendung der Chelatverbindungen in der Landwirtschaft hat große Erfolge bei der Heilung der Eisenchlorose gezeitigt.

4. Die Bedeutung der Chelatverbindungen in der Eisenernährung:

Die Pflanzen selbst bedienen sich häufig solcher Verbindungen bei ihrer Eisenversorgung. Manche Pflanzenarten sind in der Lage, im Falle der Hemmung der Fe-Aufnahme durch andere Metallionen, spezifische Chelatverbindungen im Wurzelsaft zu synthetisieren, welche die Eisenaufnahme ermöglichen.

Die hohen Stabilitätskonstanten der Chelate in den verschiedenen biologischen pH-Bereichen führten zu ihrer häufigen Anwendung bei der Heilung der durch verschiedene Ursachen entstandenen Eisenchlorose. Die Fe-Absorption aus den Chelatverbindungen durch die verschiedenen Pflanzenarten hängt auch von den Stabilitätskonstanten dieser Verbindungen ab. Manche Pflanzenarten zeigten keinen Zusammenhang zwischen der Fe-Absorption aus solchen Verbindungen und deren Eigenschaften. Dies gibt einen Hinweis über eventuelle Veränderungen dieser Verbindun-

gen an der Wurzeloberfläche (BROWN und Mitarbeiter 1961). Die Autoren stellten in anderen Untersuchungen mit verschiedenen Pflanzenarten aus Nährlösungen mit verschiedenen Fe-Chelatkonzentrationen unterschiedlich hohe Absorptionskapazitäten des Fe durch die Wurzeln fest.

SIMON und Mitarbeiter (1963) beziehen die Wirksamkeit der Chelatverbindungen auf drei Hauptpunkte:

- a) Die Wirkung auf das Pflanzenwachstum.
- b) Die Wirkung auf den Eisengehalt der Pflanzen.
- c) Die Wirkung auf die Intensität der Chlorophyllsynthese.

Die Autoren sind der Meinung, daß Lösungen von Eisenchelaten mit Stabilitätskonstanten weniger als 10^{28} am wirksamsten sind, wenn sie $0,89 \times 10^{-5}$ M Eisen enthalten und bei pH 5,8 angewendet werden. Nach SIMON und Mitarbeitern (1962) steigt die Wirksamkeit der Chelatverbindungen mit Zunahme ihrer Stabilitätskonstanten an. Die niedrige Fe-Konzentration der Fe-Chelatverbindungen erhöht ihre Wirkung zur Heilung der Eisenchlorose. Die Chelatverbindungen mit 2 negativen Ladungen sind leichter aufzunehmen, als die mit nur einer negativen Ladung. Die Wirkung der Chelatverbindungen auf das Wurzelwachstum ähnelt ihrer Wirkung auf das Wachstum der oberirdischen Teile. Das Wurzelsystem wird durch Fe-Chelatgaben bis zum optimalen Wachstum verstärkt. Die Untersuchungen von BROWN und Mitarbeitern (1960) ergaben, daß die Chelatkomponente des Eisenchelatkompleses die Aufnehmbarkeit des Eisens durch die Wurzeln erhöht. Darüber hinaus unterscheiden sich die Wurzeln verschiedener Pflanzenarten in ihrem Verhalten gegenüber den Chelatkomponenten der verschiedenen Fe-Chelatverbindungen. "Sorghum vulgare"-Pflanzen konnten ihren Eisenbedarf durch die Ernährung mit Fe-EDDHA nicht decken, obwohl die Fe-Konzentration dieser Verbindung die EDDHA-Konzentration überwog. Andererseits konnten "Phaseolus vulgaris" und "Glycine max"-Pflanzen ihren Eisenbedarf durch die Zufuhr derselben Verbindung decken, obwohl die EDDHA-Konzentration in diesem Komplex das Neunfache der Fe-Konzentration betrug. Solche Fälle lassen sich vielleicht durch das unterschiedliche Reagieren der verschiedenen Pflanzenarten mit derselben Fe-Chelatverbindung und durch die Änderung der Stabilitätskonstanten

dieser Verbindung an der Wurzeloberfläche erklären.

WALLACE (1963) stellte eine Hemmung der Mn-Aufnahme bei der Bodenbehandlung mit Fe-Chelatverbindungen fest. Bei den höheren Fe-Chelatgaben im Boden zeigten die Pflanzen leichte Mn-Mangelsymptome. Weiterhin können die Mn-Toxizitätserscheinungen an vielen Pflanzenarten durch Bodenbehandlung mit einer Fe-Chelatverbindung beseitigt werden. Fe-Chelatverbindungen erhöhen manchmal die Zn-Aufnahme durch die Pflanzen. Dies kann durch die Entstehung von löslichen aufnehmbaren Zn-Chelaten bedingt sein. Die Anwendung der Fe-DDHA verhindert die schädliche Wirkung einer starken Zn-Aufnahme, bzw. der hohen Konzentrationen von Cu und Mn. Darüber hinaus beseitigt die hohe Eisenkonzentration einer Nährlösung die toxische Wirkung höherer Chelatkonzentrationen derselben Nährlösung. Neben der Fähigkeit der Chelatverbindungen, die Mikronährstoffbilanz in den Pflanzen auszugleichen zu halten, inaktivieren solche Verbindungen auch eine hohe Ca-Konzentration im Cytoplasma. Der Autor betrachtet solche Verbindungen als Wachstumsregulatoren, die einen Einfluß auf den weiteren Verlauf der enzymatischen Reaktionen ausüben. Die Chelatverbindungen beeinflussen die Fixierung von CO_2 , Ribose-5-Phosphat und Phosphoenolpyruvat in den pflanzlichen Geweben. Wenige Chelate hemmen aber die Entstehung solcher Reaktionen. Der Autor stellte fest, daß in den Blätterpräparaten EDTA zur maximalen Fixierung der CO_2 mit Ribose-5-Phosphat oder seiner phosphorylierten Produkte (Ribose-1,5-diphosphat) erforderlich ist. Diese Reaktion erklärt teilweise die Fixierung des CO_2 in der Photosynthese. Diese Chelatverbindung schwächt eine mögliche Schwermetalltoxizität ab, welche sich auf die enzymatischen Reaktionen auswirken kann.

Zahlreiche Hypothesen streiten bzw. widersprechen sich über den Mechanismus der Aufnahme dieser Verbindungen durch die Pflanzen. Nach der Meinung von HARTTEL (1963) wird ein Teil der zugeführten Fe-Chelatverbindung an der Wurzeloberfläche dissoziiert. Die Menge der aufgenommenen Chelatkomponenten des Fe-Chelatkomplexes spielt in der Pflanze die Rolle eines "Carrier" in der Eisentranslokation.

WEINSTEIN und Mitarbeiter (1954) untersuchten die Aufnahme der Fe-EDTA-Verbindung einer Nährlösung bei pH 7,0, im Vergleich zur Aufnahme des FeSO_4 -Salzes mit Hilfe der "Split-root"-Technik. Die Hälfte des Wurzelsystems der Sonnenblumenpflanzen wuchsen in einer FeSO_4 -haltigen Nährlösung, während die andere Hälfte in der gleichen, aber Na_2EDTA -haltigen Nährlösung wuchs. Die Wurzeln der Na_2EDTA -haltigen (Fe-freien) Nährlösung zeigten Eisenmangelsymptome. Im Gegensatz dazu wuchsen die Wurzeln der FeSO_4 -haltigen (EDTA-frei) Nährlösung gesund. Die Blätter dieser Behandlung waren grün. Zum Vergleich führten die Autoren einen anderen Versuch durch, bei dem eine Hälfte des Wurzelsystems der Sonnenblumenpflanzen FeSO_4 -haltige Nährlösung erhielt, und die andere Hälfte in ihrer Nährlösung weder FeSO_4 noch EDTA bekam. Die beiden Hälften des Wurzelsystems dieser Behandlung waren braun und die Blätter entwickelten Eisenchlorosesymptome. Das Frischgewicht der Pflanzen des zweiten Versuches war 15% des Frischgewichtes der Pflanzen des ersten Versuches.

Durch diese Untersuchungen kamen die Autoren zur Meinung, daß die aufgenommene EDTA-Verbindung in der Pflanze das Eisen in einer löslichen und nutzbaren Form hält. Das aufgenommene Eisen vom FeSO_4 -Salz alleine war in der Pflanze bei pH 7,0 nicht fähig, weiteres Pflanzenwachstum zu leisten. Die Autoren meinen, daß durch die Anwendung von EDTA das Eisen in der Pflanze chelatisiert wurde und sich am Stoffwechsel beteiligte. Dies ist aber noch kein absoluter Beweis dafür, daß das Fe-EDTA als ganzes Molekül in der Pflanze transloziert wird. Es kann aber möglich sein, daß die zugeführte Fe-EDTA-Verbindung an der Wurzeloberfläche abgebaut wird, und das Eisen mit den Abbauprodukten in der Pflanze eintritt.

Durch die Anwendung von mit ^{14}C markierter Chelatverbindung stellten HOLMES und BROWN (1955) eine Erhöhung in der Fe-Chelatkonzentration der Wurzeln fest. Die Autoren konnten auch in den Blättern und den Primordien der Sojabohnenblüten diese mit ^{14}C markierte Chelatverbindung bestimmen. Diese Untersuchungen stellten eine Trennung der beiden Komponenten der Fe-Chelatverbindung innerhalb der Pflanze fest. Diese Meinung stimmt mit dem Befund von WEINSTEIN (1954) überein, indem er die Chelat-

komponente einer zugeführten Eisenchelatverbindung bei der Synthese der Enzyme nachweisen konnte. Der Autor vermutet, daß eine bestimmte Menge von Fe während des Abbaues der Fe-Chelatverbindung durch ein anderes Enzymsystem zu den Porphyrin-Enzymen transportiert wird. DEKOCK (1955) hält die Hypothese des Abbaues der Fe-Chelatverbindung an der Wurzeloberfläche oder innerhalb der Pflanze für richtiger als die Aufnahme und die Lokalisation des Fe-Chelat-Moleküls.

Zahlreiche Autoren fanden eine Relation zwischen den Komponenten der zugeführten Eisenchelatverbindung und den Komponenten der in den Blättern vorkommender Chelatverbindungen, als Hinweis für eine eventuelle Absorption und Translokalisierung des ganzen Fe-Chelatmoleküls durch die Pflanze. Die kleinen Chelatmoleküle, wie Nitrilotriessigsäure sind leichter aufnehmbar als die großen Chelatmoleküle, wie EDTA. Weiterhin nehmen die meisten Pflanzenarten die dreiwertigen EDTA-Komplexe leichter als die zweiwertigen auf.

Nach DEKOCK und MITCHELL (1954) kann eine Absorption der Chelatkomponente eher im pH-Bereich unter 6 auftreten. Die Unfähigkeit der EDTA-Komponenten, in die Pflanze einzutreten, kann auf die Zahl der ionisierten Karboxylgruppen am EDTA-Molekül bei höherem pH-Wert zurückgeführt werden.

PERKINS und PURVIS (1954) stellten toxische Symptome nach der Behandlung mit größeren Mengen von EDTA als N-Quelle in Abwesenheit von N fest. Versuche zur Heilung dieser Toxizität durch Zugabe von NO_3^- scheiterten. Falls der Metallchelate-Komplex in die Pflanze eintreten könnte, so wird, wie die Autoren annehmen, dieser Komplex in der Pflanze zersetzt, und die Chelatkomponente beteiligte sich an der Proteinsynthese. Es ist denkbar, daß die Pflanzen manche natürlich vorkommenden Aminosäuren durch "EDTA-Proteine" ersetzen. Die Autoren sind der Meinung, daß die Chelatkomponente nicht abgebaut wird, bevor sie in die Pflanze eintritt. Eine schwache Wirkung der EDTA-Verbindung als N-Quelle kann durch NH_4^+ -oder NO_3^- -Zufuhr vermieden werden.

Die Anwendung einer EDTA-Verbindung im Boden erhöht nicht die produzierte Menge von CO_2 . Das deutet darauf hin, daß die Chelatkomponente keine N-Quelle der Pflanze darstellt.

Die toxische Wirkung hoher Chelatkonzentrationen beschäftigte viele Autoren. Die einzelnen Chelate wirken unterschiedlich auf die Pflanze. Manche Chelate verhalten sich wie Auxine (Wuchsstoff bzw. Wachstumsregulator) (BURSTRÖM 1961). Andere Chelate können als Herbizide angewendet werden (WALLACE und Mitarbeiter 1957). Die unterschiedlichen Wirkungen der Chelate bei der Anwendung ihrer Eisenverbindungen können entweder beim Abbau an der Wurzeloberfläche oder innerhalb der Pflanze durch Bildung neuer Verbindungen, die vorteilhaft bzw. schädlich wirken, entstehen.

WEINSTEIN und Mitarbeiter (1954) stellte eine Hemmung in der Polyphenol-Oxydase-Aktivität der Gewebe der mit hoher Fe-EDTA-Konzentration behandelten Sonnenblumen fest. Die Katalase- und Cytochromoxydase-Aktivität wurde aber nicht beeinflusst. Es kann aber bei der Anwendung von EDTA-Verbindungen zur Erhöhung der Verfügbarkeit des Eisens vorkommen, daß andere essentielle Metalle mit der in größerer Konzentration durch die Pflanze aufgenommenen EDTA-Verbindung gebunden werden, und zwar besonders Mikronährstoffe, die für die Bildung vieler Enzyme erforderlich sind.

Nach WALLACE (1963) können die Pflanzen größere Mengen von Fe-EDDHA-Verbindung aufnehmen, ohne Toxizitätserscheinungen zu zeigen. Bei der Zufuhr von eisenfreier EDDHA-Verbindung zu einer Eisenmangel-Nährlösung, kann dieser Zustand für die Pflanzen sehr toxisch sein. Im Boden ist das aber nicht der Fall, weil bei EDDHA-Zufuhr das in diesem Boden vorhandene Eisen in lösliche Form umgesetzt wird. Eine ausgesprochene toxische Chelatverbindung ist Hydroxyäthyläthylendiamintriessigsäure. EDTA (Stabilitätskonstante 10^{25}) ist die am meisten angewandte Chelatverbindung in der Eisenernährung. Fe-EDDHA (Äthylendiamin-di-o-hydroxyphenyllessigsäure; Stabilitätskonstante 10^{28}) hat sich in den letzten Jahren ebenfalls als sehr geeignet in der Bekämpfung der Eisenmangelchlorose erwiesen.

Zahlreiche Autoren halten den Fe-EHPG-Komplex (Fe(III)-äthylenbis hydroxyphenylglycin; Stabilitätskonstante 10^{30}) für die stabilste Chelatverbindung. SIMON und Mitarbeiter (1962) stellen eine Hemmung der Eisenfunktion in den mit dieser Verbin-

dung behandelten Pflanzen fest, was manchmal zur Eisenmangelchlorose führen kann.

Der vorstehende Literaturüberblick behandelte die weit verzweigten Zusammenhänge in der Eisenernährung der Kulturpflanzen.

Sämtliche bisherigen Untersuchungsergebnisse zeigen die Unentbehrlichkeit des Eisens für das Pflanzenwachstum. Sowohl die natürlich vorkommende niedrige Fe-Konzentration des Nährmediums, als auch das Zusammenwirken anderer Faktoren, die zur niedrigen Fe-Konzentration im Nährmedium und zur Hemmung der physiologischen und biochemischen Funktionen des Eisens in den Pflanzen führen, bestimmen die Eisenversorgung der Pflanzen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden Wasserkultur-Versuche in zwei Vegetationsperioden durchgeführt, in denen das Eisen als Haupt- und variiertes Faktor das Wachstum von Maispflanzen bestimmt.

II Eigene Untersuchungen

Im Sommer 1965 und 1966 wurden fünf Wasserkultur-Versuche unter Verwendung verschiedener Eisenformen bei der Eisenernährung der Maispflanzen (*Zea Maiz*) "Gelber badischer Landmais" angelegt. Wasserkulturversuche haben den Vorteil, daß das Eisen in der Nährlösung nicht, wie im Boden, fixiert wird. Die Wachstumsbedingungen in solchen Versuchen können im Gegensatz zum Boden leichter beherrscht werden. In den Wasserkulturversuchen kann der Einfluß des Eisens auf das Wachstum der Pflanzen leichter und rascher betrachtet werden. Der Bedarf der Pflanzen an Eisen wird durch den benötigten Wechsel der Nährlösung geregelt. Die Versuchsbedingungen für die Aufnahme des Eisens durch die Wurzeln sind also im Wasserkulturversuch günstiger als in den Bodenuntersuchungen. Ein weiterer Vorteil der Wasserkultur ist, daß die Fe-Aufnahme zeitlich begrenzt werden kann. Eine fast eisenfreie Nährlösung kann eingesetzt werden, was bei Untersuchungen im Boden nicht möglich ist.

Die Versuchsfrage.

In den Wasserkulturversuchen sollte die Fe-Aufnahme bei Steigerung der Fe-Konzentration dreier verschiedener Eisenformen, sowie der Einfluß des Eisens auf den Ertrag, bzw. den Fe-Gehalt der Maispflanzen während einer Wachstumsperiode untersucht werden. Die Änderungen im pH-Wert der Nährlösung, die durch die Aufnahme der verschiedenen Ionen entstehen und ihre Wirkung auf die Zusammensetzung, bzw. die Fe-Konzentration dieser Nährlösung, sollten ebenso in diesen Untersuchungen aufgeklärt werden.

Die Versuchsdurchführung:

Die Pflanzen für die Wasserkultur wurden in reinem Quarzsand gezogen. Unter Gewächshausbedingungen wurden Becken aus PVC von 1/2 qm Oberfläche und 25 cm Höhe mit je 100 kg grobem, gewaschenen Quarzsand gefüllt. Die Maiskerne keimten in diesem, mit aqua dest. befeuchtetem Sand. Nach wenigen Tagen wurden dem Gießwasser eines jeden Beckens 20 g Calciumnitrat ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4 \text{H}_2\text{O}$) und 0,2 g Borax ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$) zugefügt. Das erwies sich als notwendig für die Ausbildung gesunder Wurzeln. Bei einer Höhe von etwa 18-20 cm wurden die Pflanzen in 5 Liter Nähr-

lösung fassende Wasserkultur-Gefäße umgepflanzt. Die Gefäße sind zylindrisch und bestehen aus schwarz-gefärbten PVC. Jedes Gefäß wird mit einem Holz-oder Kunststoffdeckel abgedeckt. In jedem Deckel befinden sich 4 Öffnungen zur Befestigung der Pflanzen. Beim Umpflanzen wurden in jedes Gefäß 4 gut ausgebildete, gleichmäßig große Pflanzen, je eine in jede Öffnung, eingesetzt. Um die Pflanzen langsam an die Nährlösung zu gewöhnen, wurden sie zuerst in eine viertelkonzentrierte Nährlösung gesetzt. Die Wasserkulturgefäße wurden täglich zweimal mit Preßluft durchlüftet. Die Pflanzen befanden sich während der Versuche in einer Vegetationshalle, und zwar, um Temperaturschwankungen der Nährlösung zu vermeiden, standen die Wasserkulturgefäße in großen Kühlbecken.

Die Zusammensetzung der Nährlösung der Wasserkulturversuche (nach MÜNGEL 1961):

Makronährstoffe	10^{-3} mol/L	Mikronährstoffe	10^{-6} mol/L
<u>1. Gruppe</u>		$\text{MnSO}_4 \cdot 4 \text{ H}_2\text{O}$	14,0
NH_4NO_3	2,0	$\text{CuSO}_4 \cdot 5 \text{ H}_2\text{O}$	1,4
$\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6 \text{ H}_2\text{O}$	0,5	$\text{ZnSO}_4 \cdot 7 \text{ H}_2\text{O}$	1,4
CaCl_2	4,0	H_3BO_3	10,0
<u>2. Gruppe</u>		$\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2 \text{ H}_2\text{O}$	0,3
$\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2 \text{ H}_2\text{O}$	0,5		
K_2SO_4	2,0		
$\text{MgSO}_4 \cdot 7 \text{ H}_2\text{O}$	0,3		

Bei den Makronährstoffen wird eine Stammlösung von jeder Gruppe angesetzt, damit keine unlöslichen Verbindungen ausfallen. Sämtliche Mikronährstoffe werden in einer einzigen Stammlösung zusammengefaßt.

Die Fe-Düngung erfolgte in verschiedenen Formen, und je nach Versuchsplan wurden hiervon unterschiedliche Mengen gegeben:

1. Eisenchlorid, $\text{FeCl}_3 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$
2. Eisen(III)-EDTA (Natriumsalz der Äthylendiamintetraessigsäure)
3. Eisen(III)-Citrat

II.1 Die Vegetationsperiode 1965

1. Erster Versuch.

Dieser Versuch diente als Vorversuch. Sein Ziel war, eine Grundlage für die Durchführung der nächsten Versuche zu schaffen. Am 26.5.1965 wurden die Maiskeimlinge aus dem Sand in die mit 1/4 konzentrierter Nährlösung gefüllten Wasserkulturgefäße umgepflanzt. Am gleichen Tag erfolgte auch die Zugabe des Eisens. Hierzu waren Stammlösungen der einzelnen Eisenformen angesetzt worden, die dann entsprechend verdünnt wurden, sodaß nachstehende Fe-Konzentrationen vorlagen und zwar bei allen drei Eisenformen:

0; 0,2; 0,6; 1,8 und 5,4 ppm Fe (Jede Düngungsstufe umfaßte 4 Parallelgefäße).

Die erste 1/4 konzentrierte Nährlösung wurde am 29.5.1965 gegen 1/2 konzentrierte Nährlösung gewechselt. Weiterer Nährlösungswechsel erfolgte am 3.6.1965 gegen 3/4 konzentrierte Nährlösung und am 14.6.1965 gegen Vollnährlösung, immer mit gleichbleibender Konzentration der drei Eisenformen.

Ernte der Maispflanzen dieses Versuches am 29.6.1965.

1.1. Versuchsbeobachtungen.

- a) Maiskeimlinge entwickeln sich nach Einsetzen in die 1/4 konzentrierte Nährlösung gesund.
- b) Folgen einer ungenügenden Belüftung können nicht festgestellt werden.
- c) Der Eisenmangel bei den Kontrollpflanzen (ohne Fe) tritt sehr bald und zwar nach wenigen Tagen auf. Diese Pflanzen sterben im Laufe der Zeit ab.
- d) Die Pflanzen mit den übrigen Fe-Konzentrationen ergaben bei allen drei Eisenformen ein ungefähr gleiches Wachstum.

e) Die Pflanzen mit 0,2 ppm Fe als Eisenchelat sind hellgrün; bei den anderen beiden Fe-Formen zeigen die Pflanzen der gleichen Fe-Konzentration ein deutlich dunkleres Grün.

Bei der Ernte wurden die oberirdischen Teile frisch gewogen, und danach in einem Trockenschrank bei 105°C getrocknet. Die Wurzeln wurden zur Entfernung des außen anhaftenden Eisens mit aqua dest. gewaschen und ebenfalls getrocknet.

1.2. Versuchsergebnisse.

Wie schon erwähnt, galt dieser Versuch als Vorversuch. Es ergaben sich keine bedeutenden Unterschiede im Wachstum der Maispflanzen bei den gesteigerten Fe-Konzentrationen (außer 0 ppm Fe) und den drei verschiedenen Eisenformen.

Das Trockengewicht der FeCl_3 -Pflanzen war geringfügig niedriger als das bei Fe-Citrat.

0,2 ppm Fe als Chelat erzielten nur etwa 50% des Ertrages wie die beiden anderen Fe-Formen in gleicher Konzentration. Die höchste Konzentration von Fe-Chelat führte zu einem höheren Ertrag als die beiden anderen Fe-Formen.

Die Erträge an Wurzelmasse waren bei den verschiedenen Fe-Stufen und den verschiedenen Eisenformen ähnlich. Zum Teil lagen die Trockengewichte der Wurzeln aus der Eisencitrat-Reihe etwas höher als bei den anderen beiden Fe-Formen. Eine klare Wirkung der drei Eisenformen auf die Ertragsbildung konnte in diesem Versuch nicht herausgestellt werden. Vorteile und Erkenntnisse wurden jedoch aus den Ergebnissen dieses Versuches zur Erleichterung der Durchführung der nächsten Versuche gewonnen:

- a) Die angewandten Eisenstufen aller drei Eisenformen zeigten keine unterschiedliche Wirkung auf das Wachstum der Maispflanzen. In den folgenden Versuchen wurden deshalb mehr Fe-Stufen vorgegeben um deutlichere Ausschläge der Eisenwirkung auf das Pflanzenwachstum bzw. den Ertrag zu erhalten.
- b) Die Pflanzen bei niedriger Eisenkonzentration in Form von Eisenchelat (0,2 ppm Fe) zeigten schneller und stärker Eisenmangelchlorose als bei der gleichen Fe-Stufe der anderen beiden Eisenformen. Die niedrige Konzentration des Fe-Chelates ist also offenbar weniger wirksam als die gleiche Konzentration der anderen beiden Eisenformen.

- c) In diesem ersten Versuch ergaben sich bei der Eisenbestimmung im geernteten Pflanzenmaterial erhebliche Schwierigkeiten, die Anlaß gaben zu einer intensiven Überprüfung der analytischen Eisenbestimmung in pflanzlichem Material.

1.3. Die Methodik der Eisenbestimmung.

Die Bedeutung des Eisens im pflanzlichen Stoffwechsel macht seine quantitative Bestimmung notwendig.

Voraussetzung jeder analytischen Bestimmung ist eine ausreichende Zerkleinerung und Homogenisierung des pflanzlichen Materials. Hierbei kann es, besonders im Falle der Eisenbestimmung, zu Verunreinigungen durch Eisenabrieb von der Mühle kommen. Indessen konnten solche Einwirkungen nicht festgestellt werden.

Die angewandte Methodik erfordert nur geringe Einwaagen. Die Zerstörung der organischen Substanz und die Mineralisierung der Mineralstoffe stellt bei der Eisenbestimmung ein schwieriges Problem dar. Die folgenden Veraschungsprozesse wurden geprüft:

- a) Trotz völliger Zerstörung der organischen Bestandteile der in Porzellantiegel eingewogenen Proben durch die trockene Veraschung im Muffelofen bei $450-500^{\circ}\text{C}$ konnte der Rückstand durch verdünnte HCl und H_2SO_4 nicht aufgelöst werden. Dies ist nur durch die Entstehung sehr schwer löslicher Oxyde zu erklären. Auch das Einbrennen einzelner Aschebestandteile in das Porzellan ist möglich, die durch verdünnte Säuren nicht freigesetzt werden.
- b) In Platinschalen wurden Proben mit wenigen Tropfen konz. H_2SO_4 durchfeuchtet. Durch langsame Temperaturerhöhung wurde die Schwefelsäure bei 400°C abgedampft und die Proben durch weitere Temperaturerhöhung bis 500°C völlig verascht. Bei dieser Veraschungsart kann nicht garantiert werden, daß bei der Erhitzung der angesäuerten Proben, auch bei langsamer Temperaturerhöhung, nicht gewisse Anteile durch Verspritzen verloren gehen. Der Rückstand dieses Prozesses löste sich nicht in verdünnter HCl und H_2SO_4 auf.
- c) Die Naßveraschung mit Veraschungsgemisch (konzentrierte HNO_3 ($s=1,4$), HClO_4 ($s=1,67$) und H_2SO_4 ($s=1,84$) im Verhältnis 20:2:1) auf dem Sandbad, brachte keine befriedigende Lösung. HNO_3 und HClO_4 verdampfen und die Schwefelsäure bleibt trüb.

Auch bei der Veraschung mit konz. HNO_3 und HClO_4 (20:0,5) wurde ein unlöslicher Rückstand gebildet.

- d) Auch rauchende Salpetersäure versagte für diesen Zweck. Es wurden größere Mengen dieser Säure gebraucht, ohne sämtliche Rückstände in Lösung zu bringen.

Erfolgreich war die Verwendung von konz. HNO_3 (s=1,4). Die langsame Zerstörung der organischen Substanz im Kjeldahlkolben führte zur Bildung eines farblosen Rückstandes. Dieser Rückstand löst sich schnell in 1n Schwefelsäure und gibt eine klare Lösung in der das Eisen kolorimetrisch bestimmt werden kann.

Geeignete Reagenzien zur Spurenbestimmung von Eisen sind nicht zahlreich. Das Rhodanid-Reagenz hat sich in den letzten Jahren als zu ungenau zur Bestimmung kleinster Eisenmengen erwiesen. Einige Reagenzien reagieren mit Fe(III) , andere mit Fe(II) . Die am meisten angewandten Reagenzien sind 1,10-Phenanthrolin und die ähnlich aufgebaute Verbindung α, α' -Dipyridyl. Sie reagieren nur mit Fe(II) . Der Anfärbung mit α, α' -Dipyridyl wurde in der vorliegenden Arbeit der Vorzug gegeben aus folgendem Grund:

Beide Reagenzien bilden einen stabilen Farbkomplex in einem breiten pH-Bereich (bei 1,10-Phenanthrolin pH 2-9, bei α, α' -Dipyridyl pH 3-9, SANDEL 1959). Der Farbkomplex von α, α' -Dipyridyl bleibt jedoch fast ein Jahr stabil, der vom 1,10-Phenanthrolin höchstens 20 Std. Die große Stabilität des α, α' -Dipyridyl-Farbkomplexes macht diese Methode besonders für Serienanalysen geeignet.

α, α' -Dipyridyl



Mol. Gew. = 156,18

Schwerlöslich im Wasser, leicht löslich in Alkohol, Äther, Chloroform, Benzol und verdünnter Säuren. Das Reagenz bildet mit dem zweiwertigen Eisen den Eisen(II)-Dipyridylkomplex. Die beiden freien Elektronenpaare der basischen Stickstoffatome dieser Verbindung sind befähigt, eine koordinativ kovalente Bindung

zu betätigen und ermöglichen so die Bildung eines im pH-Bereich 3-9 sehr stabilen Durchdringungskomplexes, dessen Kation die Zusammensetzung $(\text{Fe}(\text{C}_{16}\text{H}_8\text{N}_2)_3)^{2+}$ besitzt. Als Anion fungiert ein einfaches Ion wie Cl^- . In diesem Fall erhält man ein lösliches Komplexsalz von roter Farbe, die über Monate unverändert bleibt.

Die Bildung dieses löslichen roten Komplexes erlaubt einen überaus zuverlässigen, praktisch spezifischen und sehr empfindlichen Eisennachweis. Farbton und Farbtintensität werden weder durch Änderung des pH-Wertes zwischen 3 und 9, noch durch einen Überschuß an Reagenz beeinflusst (LANGE 1952). Das Maximum der Extinktion liegt bei 522 m μ . Das Beersche Gesetz ist im Bereich dieser Wellenlänge erfüllt.

Die kolorimetrische Bestimmung des Fe als Fe(II)-Dipyridylkomplex-Form in einer Mischung von verschiedenen Fe-Wertigkeiten erfordert eine völlige Reduktion des Fe^{+++} zu Fe^{++} . Als geeignete Reduktionsmittel bewährten sich Hydroxylaminchloridhydrat, Titan(II)-Chlorid, Hydrochinon, Natriumhydrosulfat, Ascorbinsäure und Hydrazin.

Andere Metalle, die auch Aminkomplexe bilden, reagieren ebenfalls, jedoch zu nur schwach gefärbten Komplexen. Mangan stört in mehr als 100 fachem Überschuß die Eisenbestimmung durch Bildung einer braunen Färbung, Kupfer(II) erst in 1000 fachem Überschuß. Nickel und Kobalt reagieren in sehr geringen Konzentrationen mit dem Reagenz. Die Störwirkung solcher Kationen kann durch einen Reagenzüberschuß vermieden werden.

Am Material des ersten Versuches wurden eingehende Untersuchungen über die Entstehung des rosa-roten Farbkomplexes angestellt. Es ergaben sich hierbei folgende Voraussetzungen für eine einwandfreie Eisenbestimmung:

- a) Die Pflanzensubstanz muß sich nach der nassen Veraschung in der verdünnten Säure völlig auflösen und eine klare Lösung bilden.
- b) Die Änderung des pH-Wertes bei Zugabe der benötigten Reagenzien führt zu einem wechselhaften Zustand des zu bestimmenden Eisens. Die Stabilisierung des pH-Wertes wird durch eine Pufferlösung erzielt. In manchen Methoden wird für die Sta-

bilisierung des pH-Wertes eine Neutralisation vorgenommen. Die Auswirkung eines solchen Verfahrens zeigt sich in den schwankenden pH-Werten, trotz der Neutralisation. SCHAUM-LÖFFEL (1962) und die meisten anderen Autoren, neutralisierten die Probelösung bis zum Farbumschlag eines Indikators. Eine scharfe Neutralisation durch diese Verfahren ist aber schwer zu erreichen. Auch haben die meisten Autoren diesen Neutralisationsprozess vor der notwendigen Reduktion des Eisens durchgeführt. In diesem Fall entsteht die Gefahr der Ausfällung von dreiwertigem Eisen. Darüber hinaus führt die Fe-Reduktion mit schwefliger Säure nach der Neutralisation erneut zu einem sehr niedrigen pH-Wert, bei dem die Eisen(II)-Verbindungen nicht stabil bleiben.

- c) Wie schon erwähnt, verlangt die Bestimmung des Eisens durch die Bildung von Fe(II)-Dipyridyl, daß das gesamte Eisen als Fe^{++} vorliegen muß. Als Reduktionsmittel wurden in diesen Untersuchungen Hydroxylaminhydrochlorid, Hydrochinon und schweflige Säure angewendet. Die schweflige Säure erwies sich für diesen Zweck als sehr geeignet. Die Meinung von KRISCHNA-MURTI und Mitarbeitern (1966), daß für den Reduktionsprozess ein höherer pH-Wert am geeignetsten ist, wurde in diesen Untersuchungen bestätigt. Die völlige Reduktion des Fe^{3+} wurde bei pH 4,8 festgestellt.
- d) Die vollständige Bildung des Farbkomplexes benötigt eine bestimmte Zeit.

Unter Berücksichtigung der bei den Voruntersuchungen gewonnenen Erfahrungen wurde die Eisenbestimmung nach folgender Arbeitsvorschrift ausgeführt:

1/4-1/2 g der getrockneten und gemahlenden Maispflanzen werden mit 30 ml konz. HNO_3 ($s=1,4$) im Kjeldahlkolben in einem Trockenschrank mit Umluft bei 80°C über Nacht erwärmt. Dieser Vorgang dient zur langsamen Zerstörung der organischen Substanz und zur Erleichterung der weiteren nassen Veraschung. Am nächsten Tag werden diese Proben auf dem Sandbad verascht, zuerst bei kleiner Heizstufe bis zum Verschwinden der braunen nitrosen Gase, dann auf größter Heizstufe. Falls HNO_3 zur völligen Veraschung nicht ausreicht, werden weitere 20 ml konz. HNO_3 zu-

gefügt, und es wird weiter verascht, bis zur Entstehung einer klaren Lösung bzw. eines farblosen Niederschlags. Eine Verunreinigung der HNO_3 an Eisen wird durch Blindproben ermittelt.

Der Rückstand der nassen Veraschung wird in 30 ml 1n H_2SO_4 aufgelöst. Die Eisenbestimmung in dieser Lösung wird wie folgt durchgeführt:

5 ml der Probelösung werden in ein 50 ml Meßkölbchen pipettiert. 1 ml Phosphorsäure (1:4 verdünnt) wird zugefügt. Der Zusatz der Phosphorsäure stabilisiert das $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ -Verhältnis. Durch die Zugabe von 10 ml 20%-Ammoniumacetatlösung wird der pH-Wert bei 4,8 stabil gehalten. Das dreiwertige Eisen wird mit 4 ml schwefeliger Säure (5-6% SO_2) reduziert (Trotz der Zugabe von schwefeliger Säure bleibt der pH-Wert bei 4,8 stabil). Zum Kölbcheninhalt werden 2 ml α, α' -Dipyridyl-Lösung (1% in n/10 HCl) (Reagenz-überschuß) zugegeben. Das Kölbchen wird bis zur Marke aufgefüllt.

Wichtig zu erwähnen ist, daß nach jeder Reagenzzugabe der Inhalt des Kölbchens intensiv umgeschüttelt werden muß.

Bei den nachfolgenden Untersuchungen wurde so verfahren, daß die Proben abends angefärbt wurden und im Dunkeln bis zum nächsten Morgen stehen blieben, und danach mit dem "Elko II" (Filter S 49) gemessen wurden.

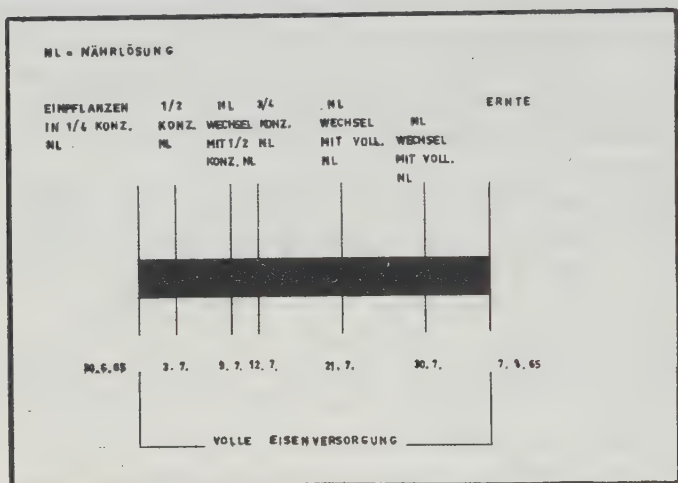
Die Extinktionen werden mit einer Eichkurve verglichen.

2. Zweiter Versuch.

Die Maiskeimlinge wurden am 30.6.1965, wie bereits im ersten Versuch beschrieben, in die mit 1/4 konzentrierte Nährlösung gefüllten Wasserkulturgefäße umgepflanzt. Am gleichen Tag wurde mit allen drei Eisenformen folgende Steigerung des Fe-Gehaltes der Nährlösung vorgenommen:

0; 0,3; 0,6; 1,2; 2,4; 4,8 und 9,6 ppm Fe in der Nährlösung.

Das folgende Schema gibt weitere Einzelheiten über den Versuchsverlauf:



2.1. Versuchsbeobachtungen.

Bereits eine Woche nach dem Umpflanzen blieb das Wachstum der Pflanzten bei 0 ppm Fe zurück. Die grüne Farbe wurde immer heller bis zum völligen Absterben.

Die Pflanzten der niedrigsten Fe-Stufe (0,3 ppm Fe) bei Eisenchelate-Behandlung, entwickelten 14 Tage nach Versuchsbeginn typische Eisenmangelsymptome (Abb. 11).

Nach 4 Wochen vom Umpflanzen wurde die unterschiedliche Wirkung der verschiedenen Eisenstufen bei den drei Eisenformen deutlich. Die Maispflanzten bei 0,3-0,6-1,2 ppm Fe als Eisenchlorid und Eisencitrat wuchsen optimal. Während 4,8 und 9,6 ppm Fe in Form dieser beiden Salze zu einer geringen Ertragsdepression führte, entwickelten sich die Maispflanzten bei der gleichen Konzentration von Fe-EDTA optimal.

Bei der Wurzelentwicklung konnten bei allen drei Eisenformen ab 0,3 ppm Fe keine Unterschiede verzeichnet werden; lediglich bei den beiden höchsten Fe-Chloridstufen war das Wurzelwachstum etwas gehemmt.

Die geernteten Pflanzen wurden gewogen, getrocknet und nochmals gewogen. Die getrockneten Pflanzen der 4 Gefäße jeder Versuchsreihe wurden zusammen gemischt und gemahlen. Ihr Fe-Gehalt wurde ermittelt. Ebenso wurde der Eisengehalt in der gewechselten Nährlösung bestimmt. Aus jedem Gefäß einer Versuchsreihe wurden 25 ml Nährlösung entnommen, vermischt und das Eisen nachgewiesen. Ebenso wie in diesem wurde auch in den nächsten Versuchen verfahren.

2.2. Versuchsergebnisse.

a) Eisengehalt in den gewechselten Nährlösungen (Tab. 18).

a.a) Die Tabelle gibt ein Bild über die Eisenaufnahme durch die Maispflanzen während der Versuchsperiode. Im allgemeinen nehmen die jüngeren Pflanzen größere Mengen Eisen auf als die älteren.

a.b) Weiterhin wird bei den niedrigen Konzentrationen von Eisenchlorid und Eisencitrat mehr Eisen aufgenommen als bei Eisenchelat. Die Pflanzen kommen aber mit diesen niedrigen Fe-Konzentrationen in Eisenchelat-Form nicht aus, wie die Eisenmangelsymptome erkennen lassen.

a.c) Die Maiswurzeln sind in der Lage, größere Eisenmengen aus Eisenchlorid und Eisencitrat zu absorbieren, als aus Eisenchelat.

b) Laut Tabellen 19, 20 und 21 ergab die Eisenchlorid-Behandlung bei 0,3 und 0,6 ppm Fe den höchsten Ertrag (oberirdische Teile und Wurzeln) und die Eisencitrat-Behandlung bei 0,6 ppm Fe. Bei höheren Konzentrationen sinken die Erträge der Maispflanzen bei den beiden genannten Eisenformen ab. Der Ertrag der Eisenchelat-Pflanzen steigt bis zur letzten Fe-Stufe an. Den höchsten Ertrag dieses Versuches brachte die Eisenchelat-Behandlung bei 9,6 ppm Fe. Die Ertragsverhältnisse der Wurzeln ähnelten den Erträgen der oberirdischen Teile.

c) Die Abbildungen 12a, 13a und 14a stellen die Relation zwischen Trockenerträgen, Eisengehalt der Nährlösung und der Menge des aufgenommenen Eisens dar. Es geht hieraus hervor:

- c.a) 1 g Trockensubstanz der mit eisenfreier Nährlösung ernährten Pflanzen enthält mehr Eisen als 1 g Trockensubstanz der Pflanzen des höchsten Ertrages, die mit den drei Eisenformen behandelt wurden.
- c.b) Bei den höheren Konzentrationen von Fe-Chlorid und Fe-Citrat in der Nährlösung steigt der Eisengehalt in 1 g Trockensubstanz an, bei gleichzeitigem Absinken des Ertrages.
- c.c) Mit steigender Konzentration von Fe-EDTA in der Nährlösung steigt der Ertrag bis zur höchsten Konzentration an. Hierbei sank der Eisengehalt anfänglich ab; bei den höheren Fe-Konzentrationen in der Nährlösung änderte er sich nur noch wenig. In diesem Versuch zeigten die Pflanzen keine Wachstumsdepressionen durch eine starke Eisenaufnahme in der Chelat-Form. Bei der höchsten Chelatstufe und gleichzeitig der höchsten Ertragsstufe enthielten die Pflanzen mehr Eisen als bei der höchsten Ertragsstufe von Eisenchlorid und Eisencitrat.
- d) Aus den Abbildungen 12b, 13b und 14b ist zu ersehen:
 - d.a) Die höchsten Erträge an oberirdischen Teilen korrespondieren mit den höchsten Erträgen an Wurzeln. Bei den Eisenchlorid- und Eisencitrat-Steigerungen steigt der Eisengehalt der Wurzeln an.
 - d.b) Die Maiswurzeln absorbierten größere Mengen aus Fe-Chlorid und Fe-Citrat. Bei den Maiswurzeln in Fe-EDTA war das kaum der Fall.
 - d.c) Die Steigerung bis auf 9,6 ppm Fe in der Nährlösung verursachte eine gehemmte Wurzelbildung bei Fe-Chlorid. Bei Fe-EDTA und Fe-Citrat war bis zur höchsten Stufe kein Abfall im Wurzelertrag festzustellen.

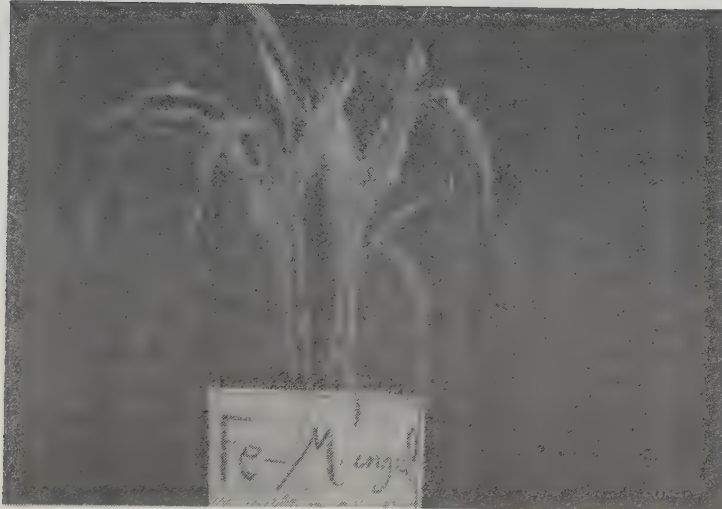


Abb. 11

Die abwechselnd hell und grün gestreiften Blätter sind ein typisches Symptom des Eisenmangels bei Maispflanzen.

Die Chlorophyllsynthese wird gehemmt. Das wenige vorhandene Chlorophyll konzentriert sich um die Hauptadern der Blätter.

Tab. 18

Zweiter Versuch (1965)

Eisengehalt der Nährlösung zu verschiedenen Zeiten

Fe-Form	ppm Fe der Nährlösung zugesetzt	ppm Fe in der Nährlösung gemessen am		
		9.7.1965	21.7.1965	30.7.1965
Fe-Chlorid	0	0,02	0,03	0,03
	0,3	0,033	0,06	0,15
	0,6	0,05	0,083	0,6
	1,2	0,06	0,13	0,83
	2,4	0,43	0,15	1,6
	4,8	1,2	0,47	3,4
	9,6	3,8	1,0	4,3
Fe-Chelat	0	0,02	0,03	0,03
	0,3	0,15	0,13	0,11
	0,6	0,37	0,49	0,43
	1,2	0,73	0,75	1,03
	2,4	1,4	1,27	1,73
	4,8	3,1	2,8	4,3
	9,6	5,1	5,8	7,4
Fe-Citrat	0	0,02	0,02	0,03
	0,3	0,062	0,047	0,03
	0,6	0,06	0,11	0,33
	1,2	0,12	0,2	0,57
	2,4	0,33	0,22	1,23
	4,8	1,03	1,8	2,7
	9,6	4,0	3,2	3,9

ABB. 12 a

ZWEITER VERSUCH 1965

ERTRAG (abs. tr.) UND Fe-GEHALT DER

EISENCHLORID-PFLANZEN (SPROSS)

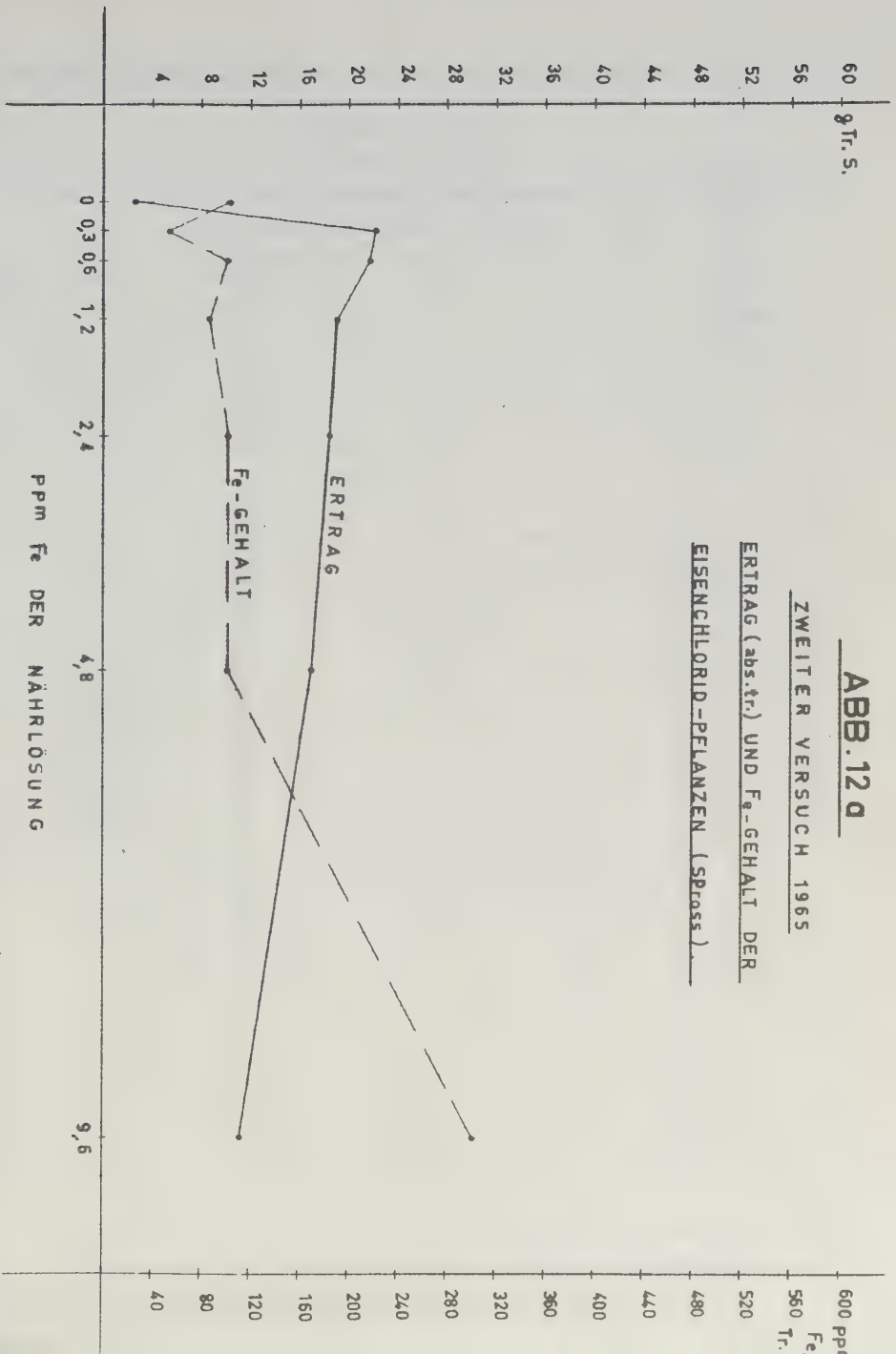
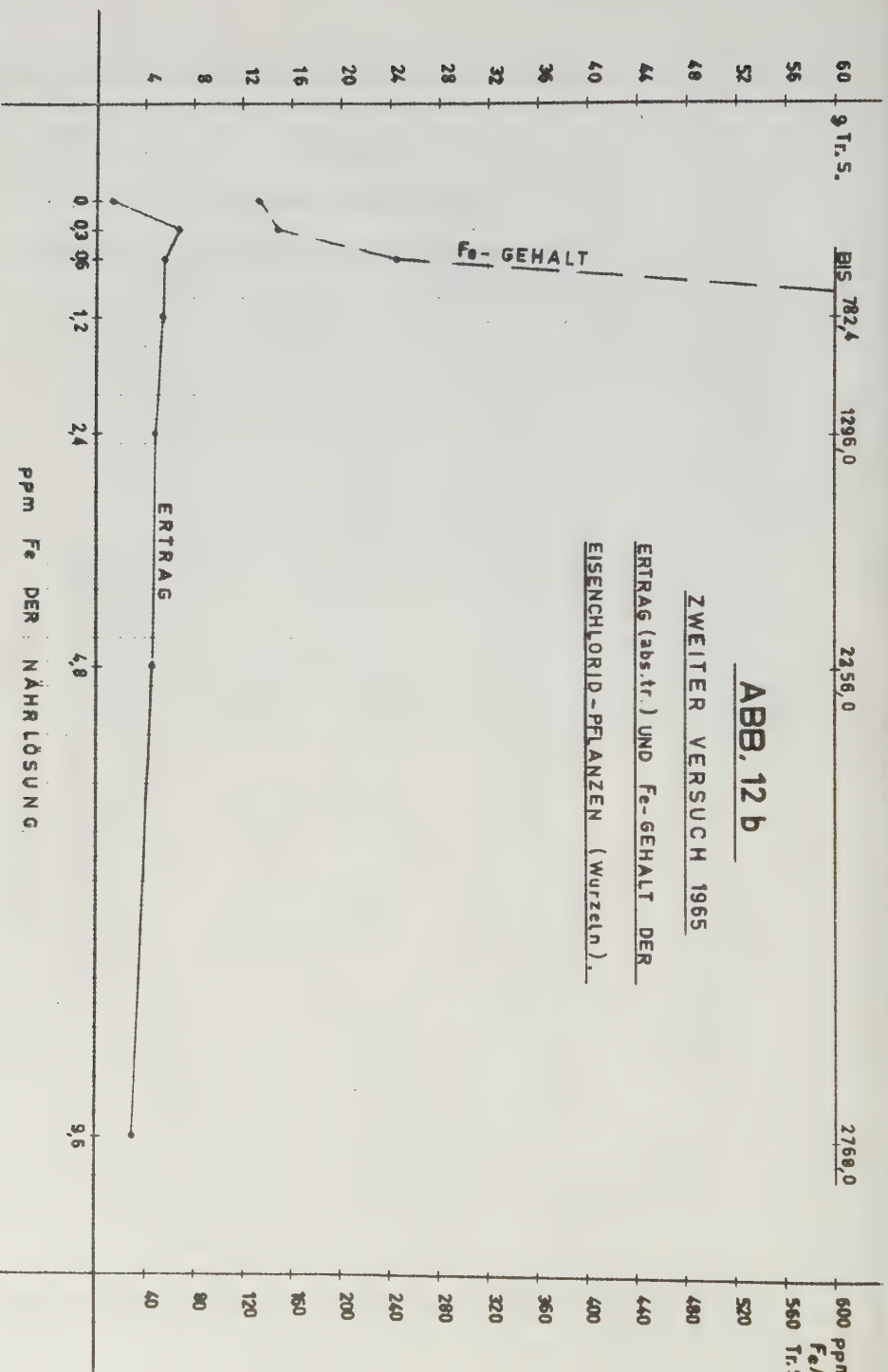


ABB. 12 b

ZWEITER VERSUCH 1965

ERTRAG (abs.tr.) UND Fe-GEHALT DER
EISENCHLORID-PFLANZEN (Wurzeln).



Tab. 19

Zweiter Versuch (1965)

Ertrag (frisch und abs. trocken), Eisengehalte und Eisenentzüge
der Eisenchlorid-Maispflanzen.

ppm Fe der Nähr- lö- sung	Ertrag/Gefäß g Frischsub.		Ertrag/Gefäß g abs. Tr.-Sub.				g Fe/g Trockensub.		mg Fe/ Trockensub. je Gefäß	
	Ober. Teile	Mit- tel	Ober. Teile	Mit- tel	Wur- zeln	Mit- tel	Ober. Teile	Wur- zeln	Ober. Teile	Wur- zeln
0	26,0 40,0 22,0 38,0	31,5	2,2 3,2 2,0 3,1	2,6	1,3 2,0 1,0 1,9	1,5	103,2	134,4	0,268	0,188
0,3	239,0 248,0 223,0 223,0	233,5	23,2 24,5 21,0 20,0	22,2	7,8 6,2 6,1 7,2	6,8	55,2	151,2	1,225	1,028
0,6	245,5 227,0 237,5 238,0	237,0	22,2 20,0 23,2 21,5	21,7	5,2 5,4 7,0 4,9	5,6	101,0	247,2	2,192	1,384
1,2	185,0 231,0 220,0 210,0	211,5	16,0 21,0 20,5 19,0	19,1	4,8 6,0 6,0 5,1	5,5	86,4	782,4	1,650	4,303
2,4	198,0 227,5 181,0 193,0	200,0	20,0 19,0 18,0 16,8	18,4	5,2 4,6 4,5 5,0	4,8	102,0	1296,0	1,877	6,221
4,8	220,0 181,0 154,0 166,0	180,0	22,1 16,0 15,1 15,0	17,0	4,5 5,2 5,0 3,6	4,6	103,0	2256,0	1,751	10,378
9,6	93,0 120,0 130,0 116,0	115,0	9,2 12,0 12,5 11,1	11,2	3,2 3,8 2,0 3,0	3,0	302,4	2768,0	3,387	8,304

Bei den Erträgen sind von jeder Versuchsreihe
die Einzelwerte und die Mittelwerte angeführt.

ABB. 13d

ZWEITER VERSUCH 1965

ERTRAG (abs. tr.) UND Fe-GEHALT DER

Fe-EDTA-PFLANZEN (5pross) .

Ppm Fe DER NÄHRLÖSUNG

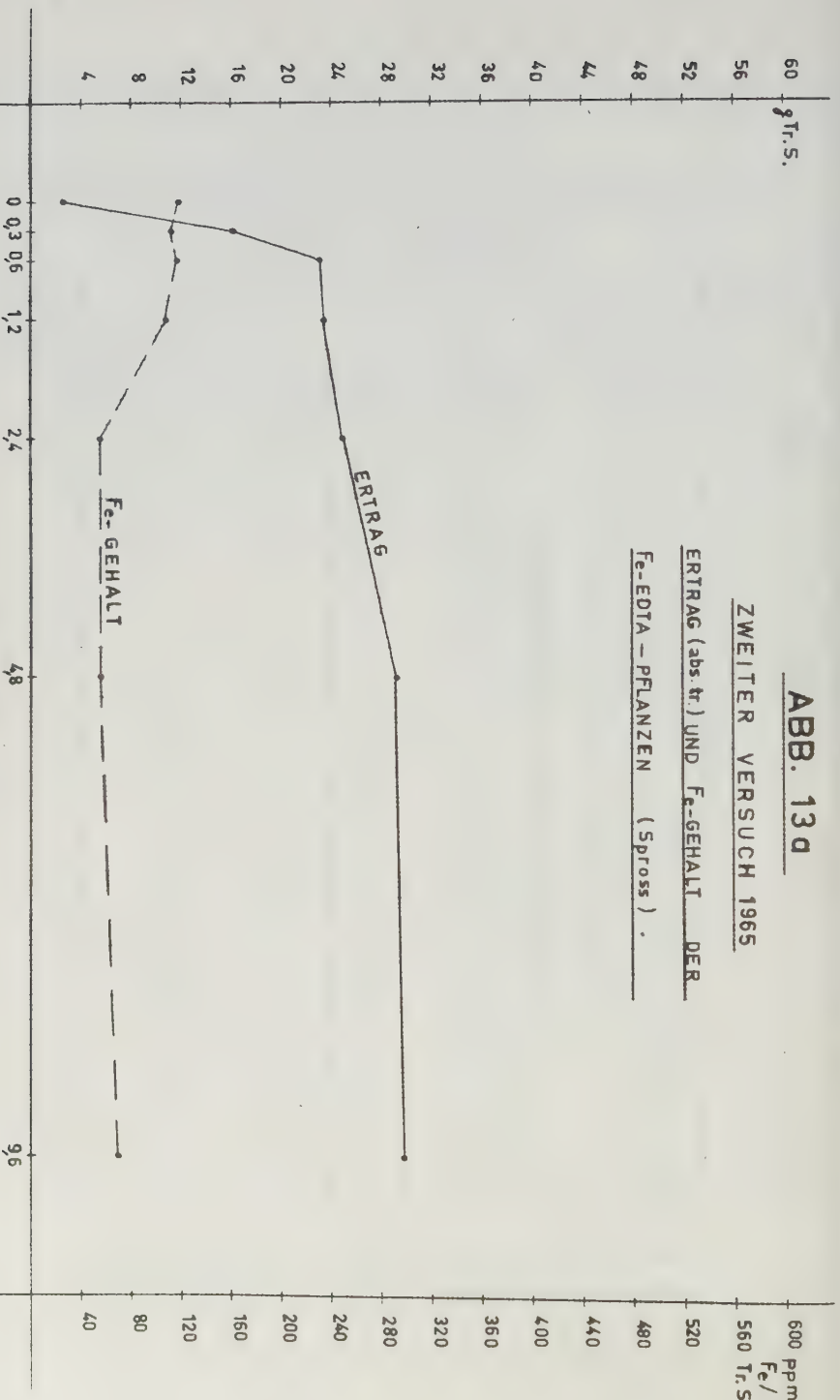
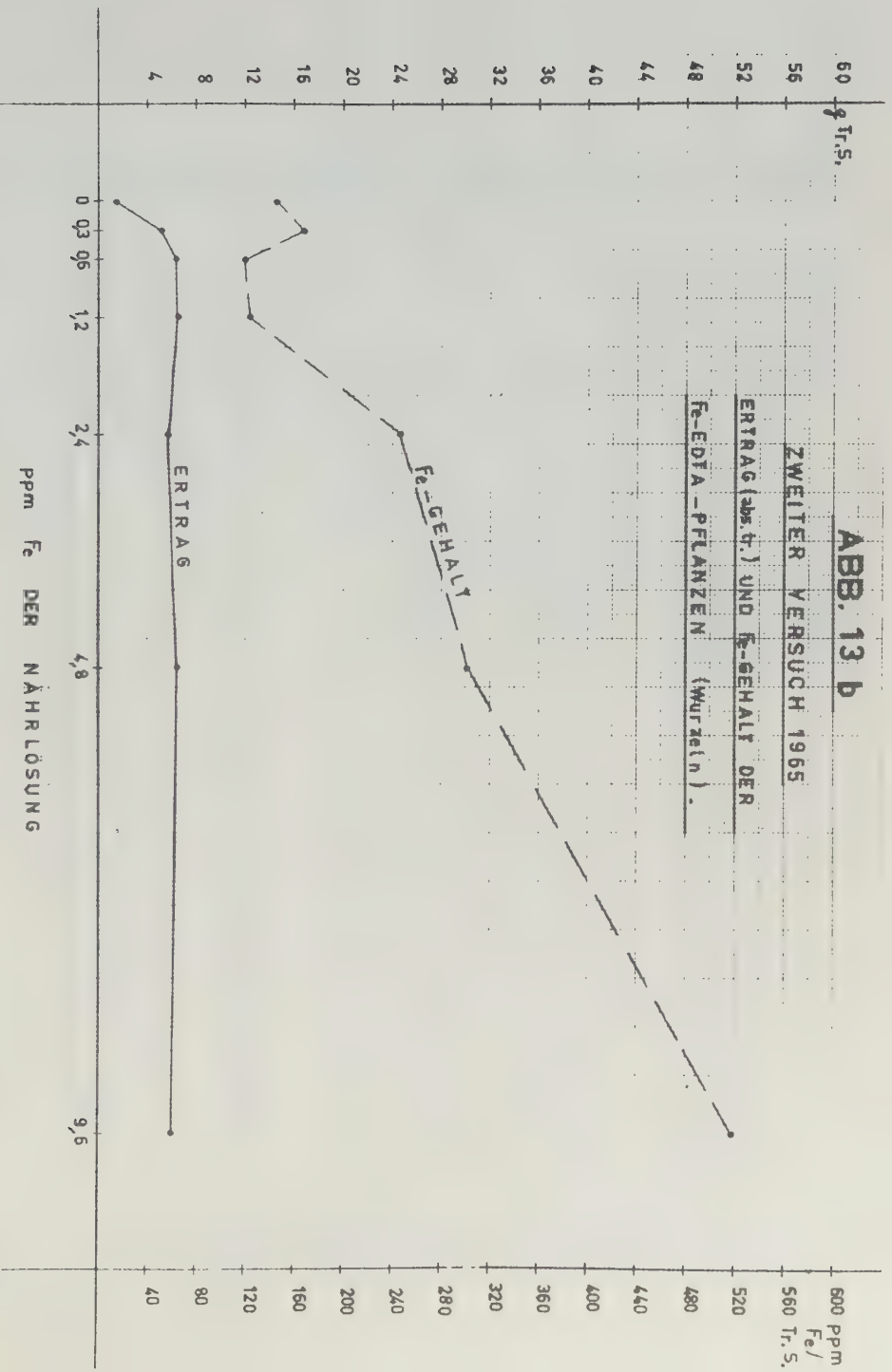


ABB. 13 b

ZWEITER VERSUCH 1965

ERTRAG (abs. t.) UND Fe-GEHALT DER

Fe-EDTA-PFLANZEN (Wurzel n) .



Tab. 20

Zweiter Versuch (1965)

Ertrag (frisch und abs. trocken), Eisengehalte und Eisenentzüge
der Fe-EDTA-Maispflanzen.

ppm Fe der Nähr- lö- sung	Ertrag/Gefäß g Frischsub.		Ertrag/Gefäß g abs. Tr.-Sub.				Fe/g. Trockensub.		mg Fe/ Trockensub. je Gefäß	
	Ober- Teile	Mit- tel	Ober- Teile	Mit- tel	Wur- zeln	Mit- tel	Ober- Teile	Wur- zeln	Ober- Teile	Wur- zeln
0	20,6 19,0 51,0 26,0	29,5	2,0 2,0 3,8 2,5	2,6	1,6 1,0 2,0 1,5	1,5	118,0	146,0	0,307	0,219
0,3	199,0 216,0 190,0 200,0	201,5	17,2 17,2 14,6 16,0	16,2	6,0 4,8 5,8 4,0	5,1	112,0	168,0	1,814	0,857
0,6	233,0 306,0 289,0 247,0	269,0	19,0 30,0 25,0 19,0	23,2	5,0 9,0 6,2 5,4	6,4	117,6	120,0	2,728	0,768
1,2	266,0 259,0 218,0 303,0	261,5	26,0 21,0 19,0 28,0	23,5	6,8 5,5 5,1 8,4	6,5	108,0	124,4	2,538	0,809
2,4	253,0 262,0 267,0 294,0	269,0	22,2 23,2 26,2 28,4	25,0	4,8 5,2 5,8 7,0	5,7	55,2	247,2	1,380	1,409
4,8	270,0 286,0 328,0 292,0	294,0	28,4 30,0 32,0 27,0	29,3	5,0 7,3 7,5 6,0	6,4	55,0	302,4	1,612	1,935
9,6	284,0 233,0 336,0 317,0	292,5	28,7 29,2 31,8 29,5	29,8	7,7 4,0 6,8 7,5	6,5	69,6	518,4	2,074	3,370

Bei den Erträgen sind von jeder Versuchsreihe
die Einzelwerte und die Mittelwerte angeführt.

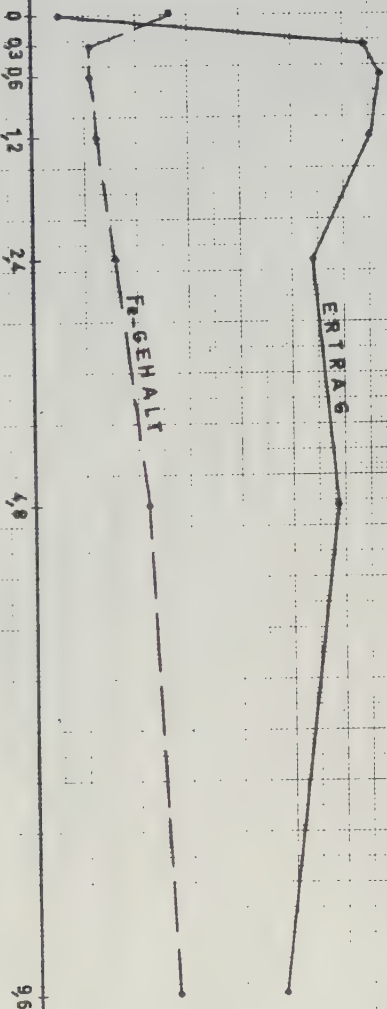
g Tr.S.

ABB. 14.0

ZWEITER VERSUCH 1935

ERTRAG (t/ha) UND Fe-GEHALT DER

EISENCRAN-PFLANZEN (Spross) .



ppm Fe DER NÄHR L Ö S U N G

600 ppm
Fe/
Tr.S.

520

480

440

400

360

320

280

240

200

160

120

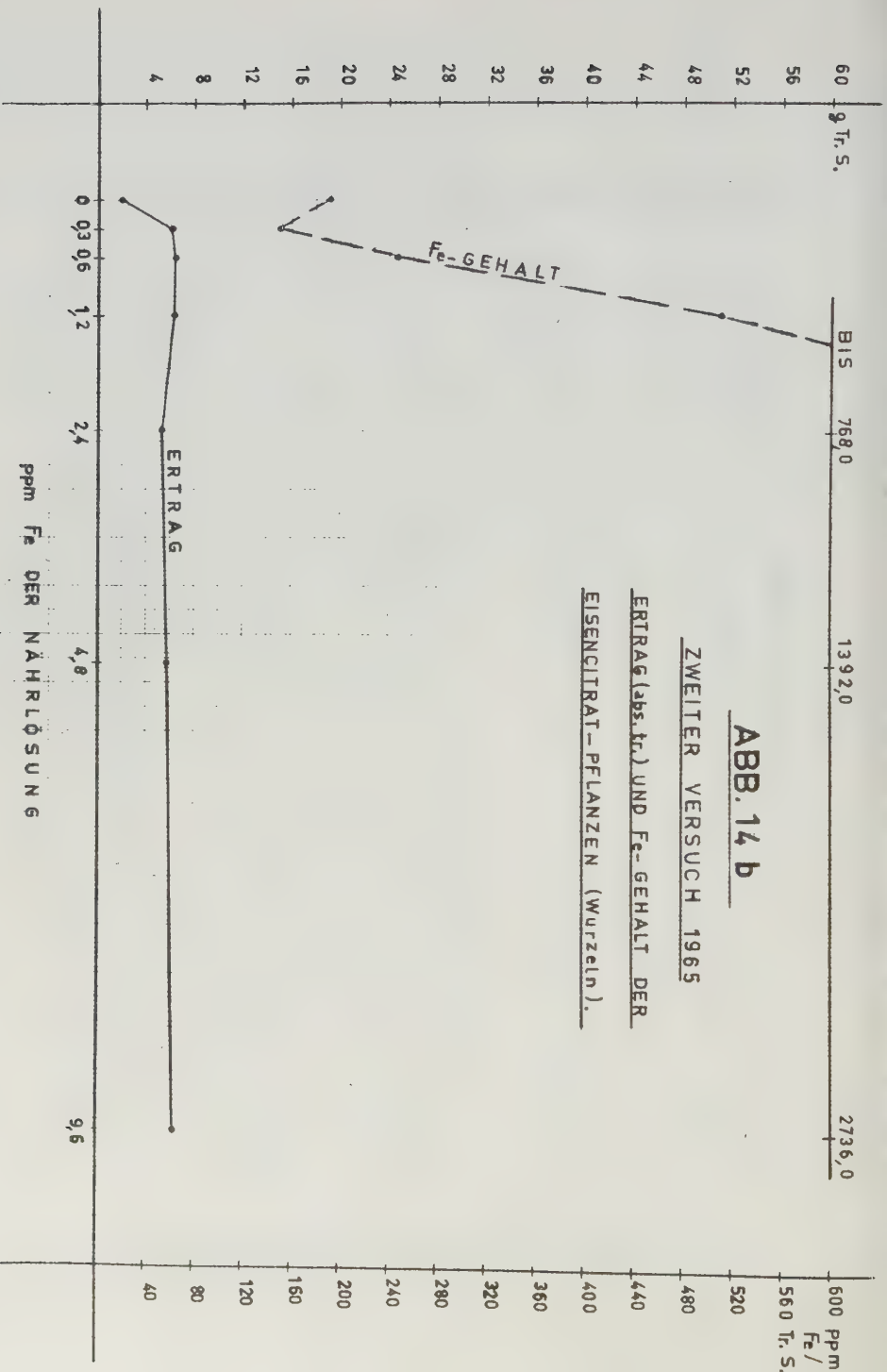
80

40

ABB. 14 b

ZWEITER VERSUCH 1965

ERTRAG (abs. tr.) UND Fe-GEHALT DER
EISENCITRAT-PFLANZEN (Wurzeln).



Tab. 21

Zweiter Versuch (1965)

Ertrag (frisch und abs. trocken), Eisengehalte und Eisenentzüge
der Eisencitrat-Maispflanzen.

ppm Fe der Nähr- lö- sung	Ertrag/Gefäß g Frischsub.		Ertrag/Gefäß g abs. Tr.-Sub.				g Fe/g Trockensub.		mg Fe/ Trockensub. je Gefäß	
	Ober. Teile	Mit- tel	Ober. Teile	Mit- tel	Wur- zeln	Mit- tel	Ober. Teile	Wur- zeln	Ober. Teile	Wur- zeln
0	15,0 24,0 14,0 31,0	21,0	1,8 2,2 1,5 3,1	2,1	1,8 2,2 1,2 2,8	2,0	107,0	191,2	0,225	0,382
0,3	284,0 252,0 263,0 285,0	271,0	26,2 25,2 25,0 26,5	25,7	5,5 7,5 5,2 6,0	6,1	45,0	151,2	1,157	0,922
0,6	342,0 265,0 271,0 281,0	290,0	34,0 22,5 24,2 26,8	26,9	7,2 5,2 5,0 8,2	6,4	45,6	247,2	1,227	1,582
1,2	255,0 255,0 292,0 284,0	271,5	21,8 24,0 29,5 29,0	26,1	5,0 5,0 7,5 7,5	6,3	50,4	511,2	1,315	3,221
2,4	270,0 228,0 228,0 254,0	245,0	23,2 20,2 20,0 23,3	21,7	5,8 5,8 4,2 5,5	5,3	64,8	768,0	1,406	4,070
4,8	221,0 255,0 261,0 230,0	242,0	22,0 23,8 26,3 22,0	23,5	6,5 6,0 5,0 5,8	5,8	88,8	1392,0	2,087	8,074
9,6	198,0 218,0 215,0 204,0	209,0	18,5 18,2 20,3 19,2	19,1	6,0 4,8 8,5 6,2	6,4	108,0	2736,0	2,063	17,510

Bei den Erträgen sind von jeder Versuchsreihe
die Einzelwerte und die Mittelwerte angeführt.

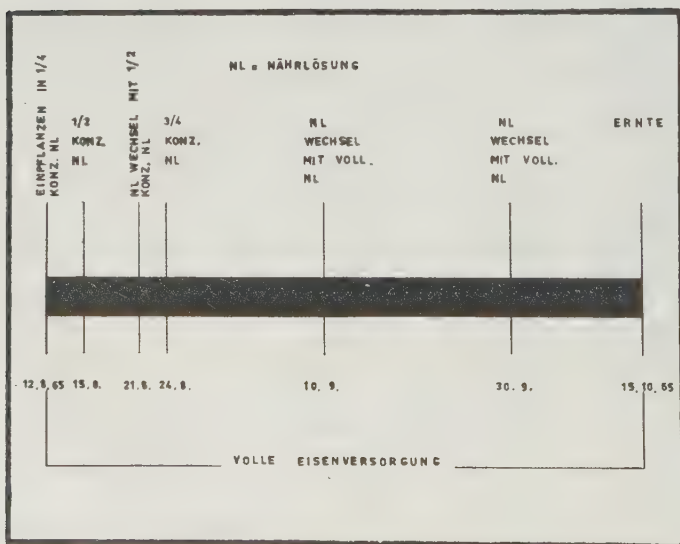
3. Dritter Versuch.

Auch dieser Versuch sollte den Einfluß steigender Eisengaben auf Ertrag und Eisengehalt von Maispflanzen zeigen. Jedoch wurde, um auch in den Bereich höchster Eisenkonzentrationen zu gelangen, die Konzentration der drei Eisenformen bis zu einem Gehalt der Nährlösung von 218,7 ppm Fe erhöht.

Die am 12.8.1965 in 1/4 konz. Nährlösung eingesetzten Maiskeimlinge wurden am gleichen Tag mit allen drei Eisenformen in folgender Steigerung behandelt:

0; 0,1; 0,3; 0,9; 2,7; 8,1; 24,3; 72,9 und 218,7 ppm Fe in der Nährlösung.

Das nachstehende Schema gibt weitere Einzelheiten über den Versuchsverlauf:



3.1. Versuchsbeobachtungen.

- a) Die Abb. 15, 16 und 17 zeigen die Wirkung der Steigerung der verschiedenen Eisenformen auf das Maiswachstum. Ganz allgemein wuchsen die Pflanzen dieses Versuches langsamer als in den vorherigen Versuchen, was auf niedrigere Temperaturen während der Versuchszeit zurückzuführen ist.
- b) Die Abbildungen lassen erkennen, daß bei Eisenchlorid und Eisencitrat die höchsten Erträge bei 0,9 ppm Fe sich ausbildeten. Bei der weiteren Steigerung der Fe-Konzentration der Nährlösung wurde das Wachstum gehemmt. Trotz des Ertragsrückganges wuchsen die Pflanzen bei 24,3 ppm Fe als Fe-Citrat viel kräftiger als die Pflanzen der selben Fe-Stufe bei Eisenchlorid-Behandlung. In diesem Versuch wurde der pH-Wert der Nährlösung bei den verschiedenen Eisenkonzentrationen mehrmals gemessen.
- c) Bei Fe-EDTA brachten erst die Pflanzen der Fe-Stufe 8,1 ppm Fe den höchsten Ertrag. Von dieser Stufe ab sank der Ertrag wieder ab.
- d) Sowohl durch das Fehlen des Eisens als auch durch seinen Überschuß in der Nährlösung in verschiedenen Formen, blieb das Wachstum der betroffenen Pflanzen zurück. Die rote Färbung der Maisblätter ist eine Folge der toxischen Wirkung der höheren Fe-Konzentration in der Nährlösung bzw. die Wirkung einer starken Aufnahme dieses Elementes.
- e) Die Wurzelbildung ähnelte den Wachstumsverhältnissen der oberirdischen Teile.

Beim Wechsel der Nährlösungen wurde in denselben der Eisengehalt bestimmt und der pH-Wert gemessen. Die Aufbereitung der geernteten Pflanzen erfolgte wie in den vorherigen Versuchen.

3.2. Versuchsergebnisse.

- a) Die Messungen des pH-Wertes beim Wechsel der Nährlösungen (Tab. 22) ergaben:
 - a.a) Verstärkte Ionenaufnahme aus der Nährlösung durch Pflanzen mit hohen Erträgen verursachte eine Erniedrigung des pH-Wertes. (Der pH-Wert einer frisch angesetzten Nährlösung liegt um den Neutralpunkt.)

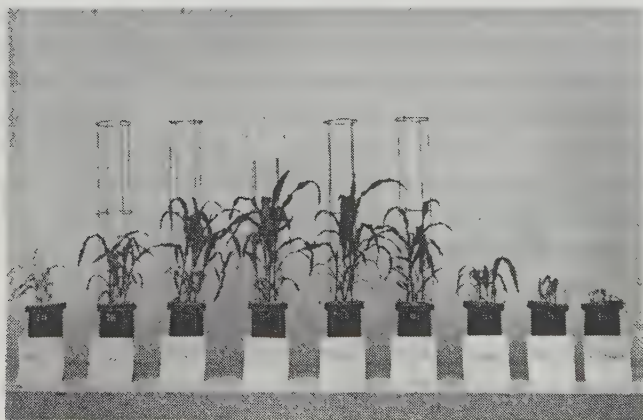
- a.b) Die Anwendung höherer Konzentrationen von Eisenchlorid erniedrigte ebenfalls den pH-Wert, was bei der Anwendung von höheren Konzentrationen von Eisenchelat und Eisencitrat nicht der Fall war.
- b) Die Bestimmung des Eisens in den gewechselten Nährlösungen (Tab. 23) gab ein ähnliches Bild für die Eisenaufnahme durch Maispflanzen, wie es schon im zweiten Versuch erhalten wurde; die jüngeren Pflanzen nahmen mehr Eisen auf als die älteren. Das meiste Eisen wird bei niedrigen Konzentrationen von Eisenchlorid und Eisencitrat aufgenommen. Niedrige Fe-Konzentrationen als Fe-EDTA führten wiederum zur Eisenmangel-Chlorose. Die Pflanzenwurzeln absorbierten größere Mengen von Eisen in Chlorid- und Citrat-Form als in Chelat-Form.
- c) Aus den Tabellen 24, 25 und 26 geht hervor, daß Eisenchlorid und Eisencitrat die höchsten Pflanzenerträge bei den Eisenstufen 0,3 und 0,9 ppm Fe erzeugen. Die Eisenchelat-Behandlung dagegen ergab den höchsten Ertrag bei der Eisenstufe 8,1 ppm Fe. Die Maispflanzen zeigten in diesem Versuch sehr deutliche toxische Wirkungen bei den höheren Konzentrationen der drei Eisenformen. Diese toxischen Wirkungen äußerten sich neben der schon beobachteten roten Färbung der Blätter, in einer sehr starken Verminderung der Pflanzenerträge. Den höchsten Ertrag dieses Versuches überhaupt brachte die Anwendung des Eisenchelats. Die Erträge der Wurzeln korrelierten mit den Erträgen der oberirdischen Teile.
- d) Die Beziehungen zwischen den Trockenenerträgen und dem Eisengehalt der Maispflanzen sind in den Abbildungen 18a, 19a und 20a dargestellt. Aus diesen Abbildungen geht hervor:
- d.a) Die Ergebnisse des dritten Versuches stimmen mit den Ergebnissen des zweiten Versuches überein, insofern als daß bei allen drei Eisenformen 1 g Trockensubstanz der Kontrollpflanzen (ohne Fe) höheren Gehalt an Eisen enthält, als 1 g Trockensubstanz der Pflanzen im Höchstertragsgebiet.
- d.b) Die sehr starke Steigerung des Eisengehaltes der mit größeren Fe-Mengen ernährten Pflanzen erklärt die ebenso starke Ertragsdepression bei solchen Pflanzen. In diesen Fällen muß das aufgenommene Eisen toxisch gewirkt haben.

- d.c) Die Untersuchung der Pflanzen bei Eisenchelat-Behandlung ergab, daß von 2,7-6,1 ppm Fe in der Nährlösung die Ertragskurve bis zum höchsten Punkt ansteigt; trotzdem bleibt der Eisengehalt unverändert.
- e) Die Untersuchungen der Pflanzenwurzeln bei den drei Eisenformen (Abb. 18b, 19b und 20b) zeigen:
 - e.a) Mit den höchsten Erträgen an oberirdischen Teile werden auch in diesem Versuch gleichzeitig die höchsten Wurzel-erträge angetroffen, die ebenfalls mit weiterer Steigerung der Eisenkonzentrationen absinken.
 - e.b) Der Eisengehalt bei höchsten Wurzel-erträgen war niedriger oder gleich dem Eisengehalt der ohne Eisen ernährten Maiswurzeln. Diese relativ niedrigen Eisengehalte beim Höchstertrag sind mit steigenden Eisengaben sehr stark angestiegen.
 - e.c) Bei den höheren Fe-Konzentrationen der Nährlösungen absorbierten die Maiswurzeln größere Eisenmengen in Eisenchlorid- und Eisencitrat-Formen als in Eisenchelat-Form. Die hohen Eisenkonzentrationen der Nährlösung in diesem Versuch führten zu z.T. außerordentlich hohen Eisengehalten der Wurzeln, vor allem bei Eisenchlorid und Eisencitrat (bis zu 60 000 ppm Fe).

Abb. 15

Dritter Versuch (1965)

Steigende Konzentrationen von Fe-Chlorid.

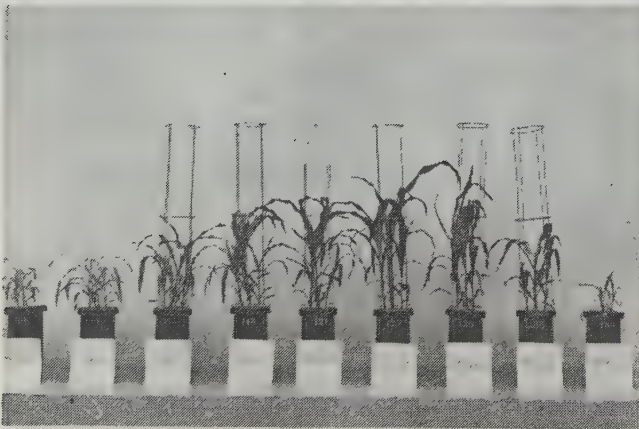


Gefäß	Nr.	70	ohne	Fe
"	"	76	0,1 ppm	"
"	"	79	0,3	" "
"	"	84	0,9	" "
"	"	85	2,7	" "
"	"	91	8,1	" "
"	"	94	24,3	" "
"	"	98	72,9	" "
"	"	103	218,7	" "

Abb. 16

Dritter Versuch (1965)

Steigende Konzentrationen von Fe-EDTA.

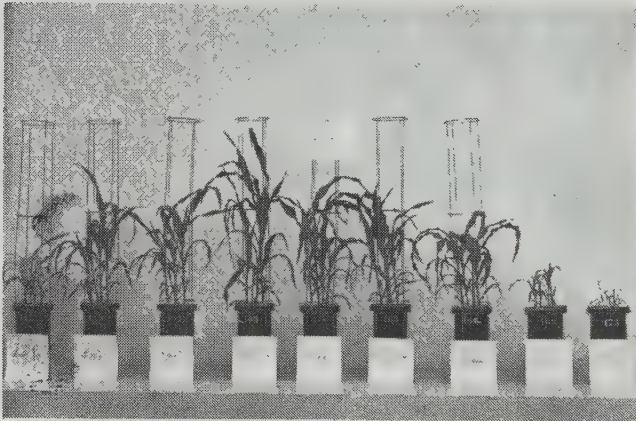


Gefäß	Nr.	106	ohne	Fe
"	"	109	0,1 ppm	"
"	"	115	0,3	"
"	"	118	0,9	"
"	"	121	2,7	"
"	"	125	8,1	"
"	"	130	24,3	"
"	"	136	72,9	"
"	"	138	218,7	"

Abb. 17

Dritter Versuch (1965)

Steigende Konzentrationen von Fe-Citrat.



Gefäß	Nr.	142	ohne	Fe
"	"	145	0,1 ppm	"
"	"	151	0,3	"
"	"	156	0,9	"
"	"	157	2,7	"
"	"	163	8,1	"
"	"	166	24,3	"
"	"	169	72,9	"
"	"	175	218,7	"

Tab. 22

Dritter Versuch (1965)
pH-Werte der Nährlösungen.

Fe-Form	ppm Fe der Nährlösung zugesetzt	21.8.65	10.9.65	30.9.65	15.10.65
Fe-Chlorid	0	6,9	6,7	5,5	6,5
	0,1	4,3	3,8	3,6	3,2
	0,3	4,2	3,7	3,4	3,2
	0,9	3,9	3,6	3,3	3,1
	2,7	3,7	3,4	3,3	3,2
	8,1	3,3	3,3	3,3	3,4
	24,3	3,3	3,1	3,0	3,0
	72,9	3,1	2,6	2,7	2,9
	218,7	2,6	2,3	2,4	2,6
Fe-Chelat	0	6,8	6,6	6,6	6,9
	0,1	6,8	6,8	6,7	6,7
	0,3	5,2	5,0	4,3	4,0
	0,9	4,1	3,7	3,3	3,3
	2,7	3,9	3,6	3,4	3,0
	8,1	4,3	4,2	3,5	3,3
	24,3	6,7	6,4	4,6	5,1
	72,9	7,0	7,0	6,5	6,6
	218,7	7,0	7,2	6,7	7,0
Fe-Citrat	0	7,0	7,0	6,8	7,0
	0,1	5,4	4,9	3,5	4,6
	0,3	5,2	5,0	3,4	3,1
	0,9	4,6	4,5	3,3	3,2
	2,7	4,1	3,8	3,4	3,4
	8,1	3,9	3,8	3,6	3,4
	24,3	3,9	3,9	3,5	3,8
	72,9	6,2	6,0	3,5	3,8
	218,7	6,9	6,6	7,1	7,0

Tab. 23

Dritter Versuch (1965)

Eisengehalt der Nährlösung zu verschiedenen Zeiten.

Fe-Form	ppm Fe der Nährlösung zugesetzt	ppm Fe in der Nährlösung gemessen am			
		21.8.65	10.9.65	30.9.65	15.10.65
Fe-Chlorid	0	0,03	0,05	0,035	0,04
	0,1	0,05	0,045	0,05	0,05
	0,3	0,05	0,05	0,05	0,05
	0,9	0,29	0,35	0,32	0,51
	2,7	1,2	0,92	0,80	1,1
	8,1	3,7	1,5	1,2	3,3
	24,3	4,5	3,53	3,3	5,1
	72,9	21,7	13,2	12,5	20,9
	218,7	79,9	54,9	59,8	73,6
Fe-Chelat	0	0,04	0,3	0,05	0,04
	0,1	0,05	0,04	0,05	0,05
	0,3	0,07	0,07	0,07	0,07
	0,9	0,58	0,64	0,52	0,65
	2,7	1,9	1,4	1,2	1,7
	8,1	6,7	5,3	5,6	7,1
	24,3	17,3	12,1	14,5	20,1
	72,9	40,3	38,9	43,1	47,8
	218,7	122,7	107,2	129,9	142,8
Fe-Citrat	0	0,03	0,03	0,03	0,05
	0,1	0,03	0,05	0,4	0,05
	0,3	0,05	0,05	0,06	0,06
	0,9	0,27	0,31	0,35	0,30
	2,7	1,3	1,0	0,98	1,4
	8,1	4,3	1,1	3,8	5,1
	24,3	8,9	10,1	11,3	9,8
	72,9	28,5	16,3	20,8	40,5
	218,7	90,5	87,5	93,3	92,5

ABB. 18 d

DRITTER VERSUCH 1965

ERTRAG (abs.t.) UND Fe-GEHALT DER

EISENCHLORID-PFLANZEN (Spross).

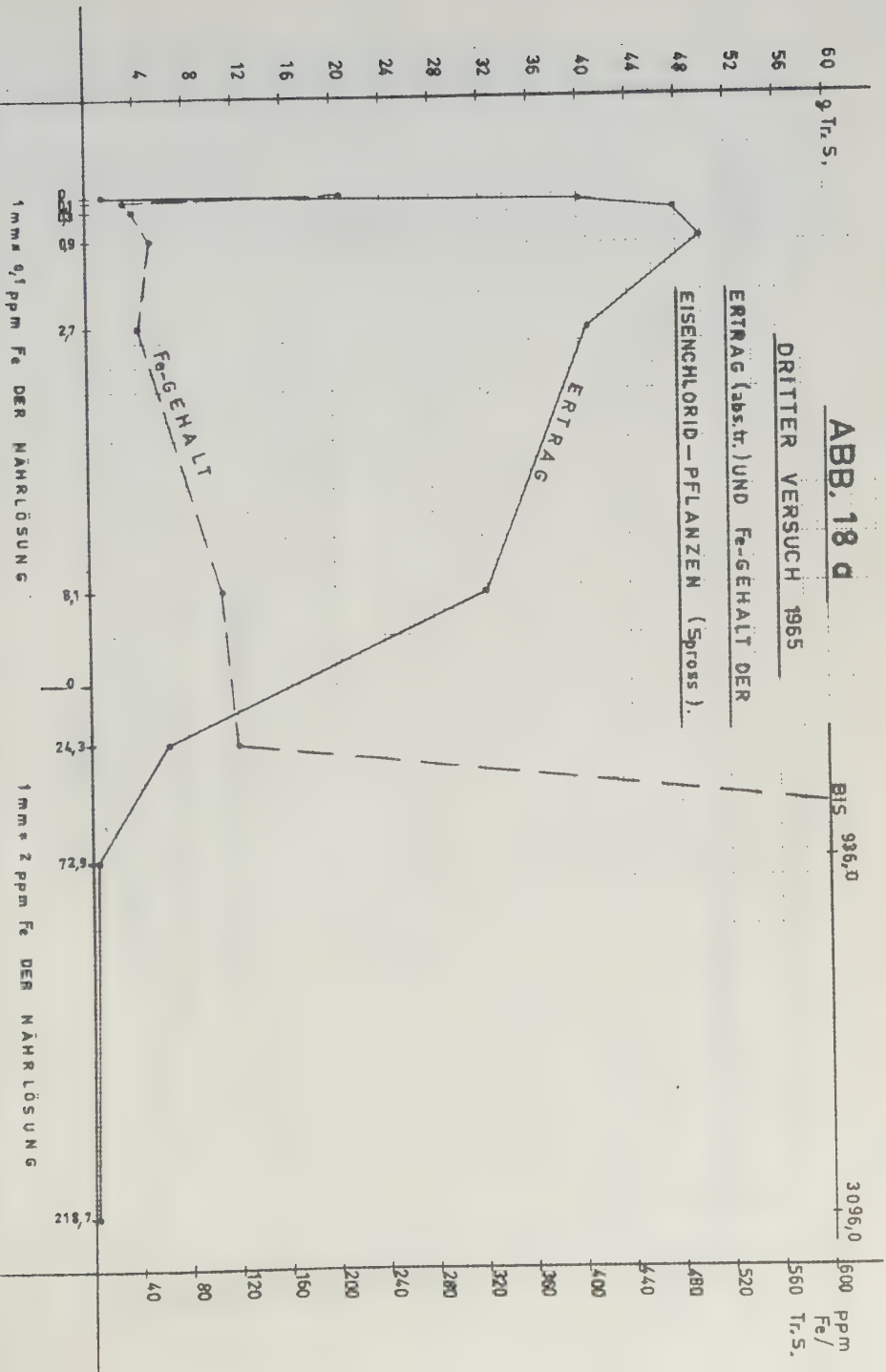
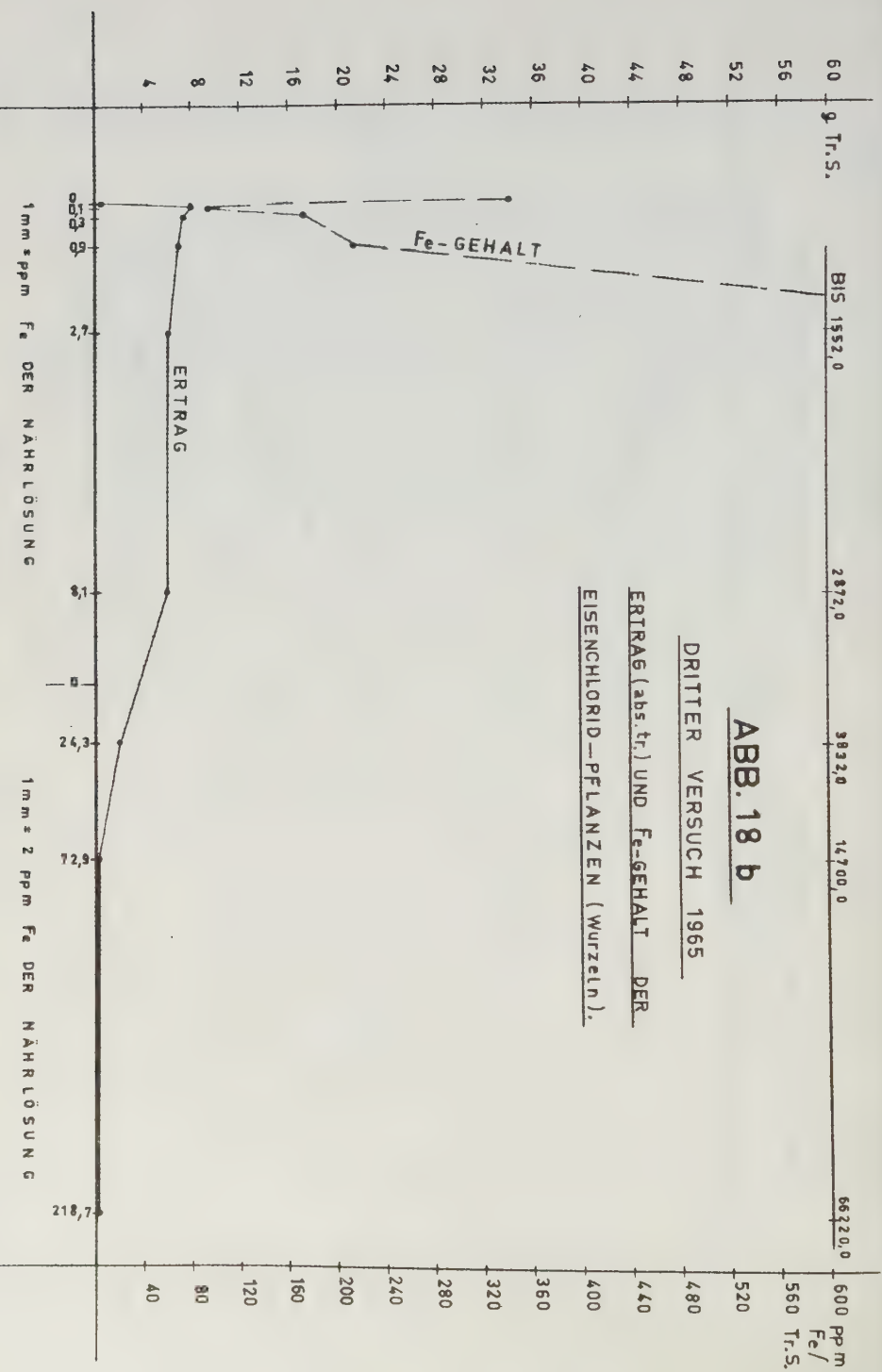


ABB. 18 b

DRITTER VERSUCH 1965

ERTRAG (abs. tr.) UND Fe-GEHALT DER
EISENCHLORID-PFLANZEN (Wurzeln).



Dritter Versuch (1965)

Ertrag (frisch und abs. trocken), Eisengehalte und Eisenentzüge
der Eisenchlorid-Maispflanzen.

ppm Fe der Nähr- lö- sung	Ertrag/Gefäß g Frischsub.		Ertrag/Gefäß g abs. Tr.-Sub.				g Fe/g Trockensub.		mg Fe/ Trockensub. je Gefäß	
	Ober. Teile	Mit- tel	Ober. Teile	Mit- tel	Wur- zeln	Mit- tel	Ober. Teile	Wur- zeln	Ober. Teile	Wur- zeln
0	2,0 7,0 3,0 15,0	6,7	1,0 1,5 1,3 2,0	1,4	0,3 0,8 0,6 0,8	0,62	206,4	342,4	0,289	0,212
0,1	366,0 312,0 368,0 349,0	349,0	42,2 38,8 42,0 37,5	40,1	8,3 7,3 8,5 8,0	8,0	31,2	95,2	1,251	0,762
0,3	400,5 404,5 459,5 393,5	414,5	43,5 50,6 58,0 39,0	47,8	7,5 7,0 8,2 7,0	7,4	38,4	174,4	1,836	1,290
0,9	660,5 744,0 715,0 640,5	690,0	45,0 54,5 52,0 48,0	49,9	6,8 7,5 7,0 7,1	7,1	52,8	215,2	2,635	1,528
2,7	397,5 328,0 342,5 364,5	358,5	41,0 37,6 41,0 43,2	40,7	7,0 5,5 6,0 6,5	6,2	62,4	1552,0	2,540	9,622
8,1	268,0 250,0 310,0 329,5	289,5	25,0 27,5 37,8 39,0	32,3	5,8 5,8 6,8 6,2	6,1	108,0	2872,0	3,488	17,519
24,3	25,0 67,0 52,5 76,0	55,5	8,8 2,0 6,0 8,8	6,4	1,8 2,5 2,0 2,2	2,1	120,0	3832,0	0,768	8,047
72,9	2,0 2,0 1,3 1,0	1,57	0,5 0,6 0,5 0,5	0,52	0,3 0,6 0,3 0,1	0,32	936,0	14700,0	0,487	4,704
218,7	0,5 0,5 0,4 0,7	0,52	0,15 0,10 0,10 0,20	0,14	0,15 0,10 0,20 0,20	0,16	3096,0	66220,0	0,433	10,595

Bei den Erträgen sind von jeder Versuchsreihe
die Einzelwerte und die Mittelwerte angeführt.

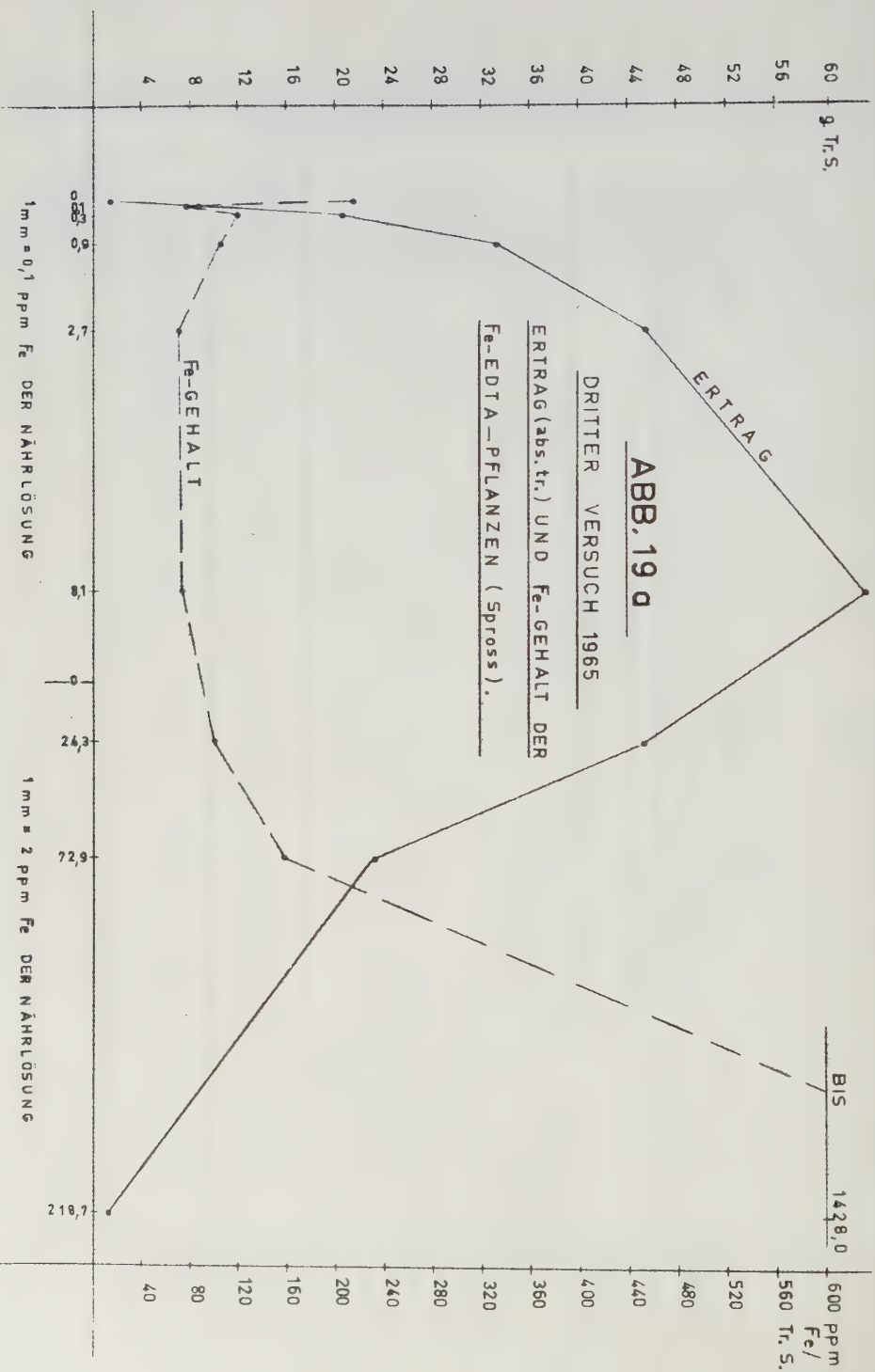
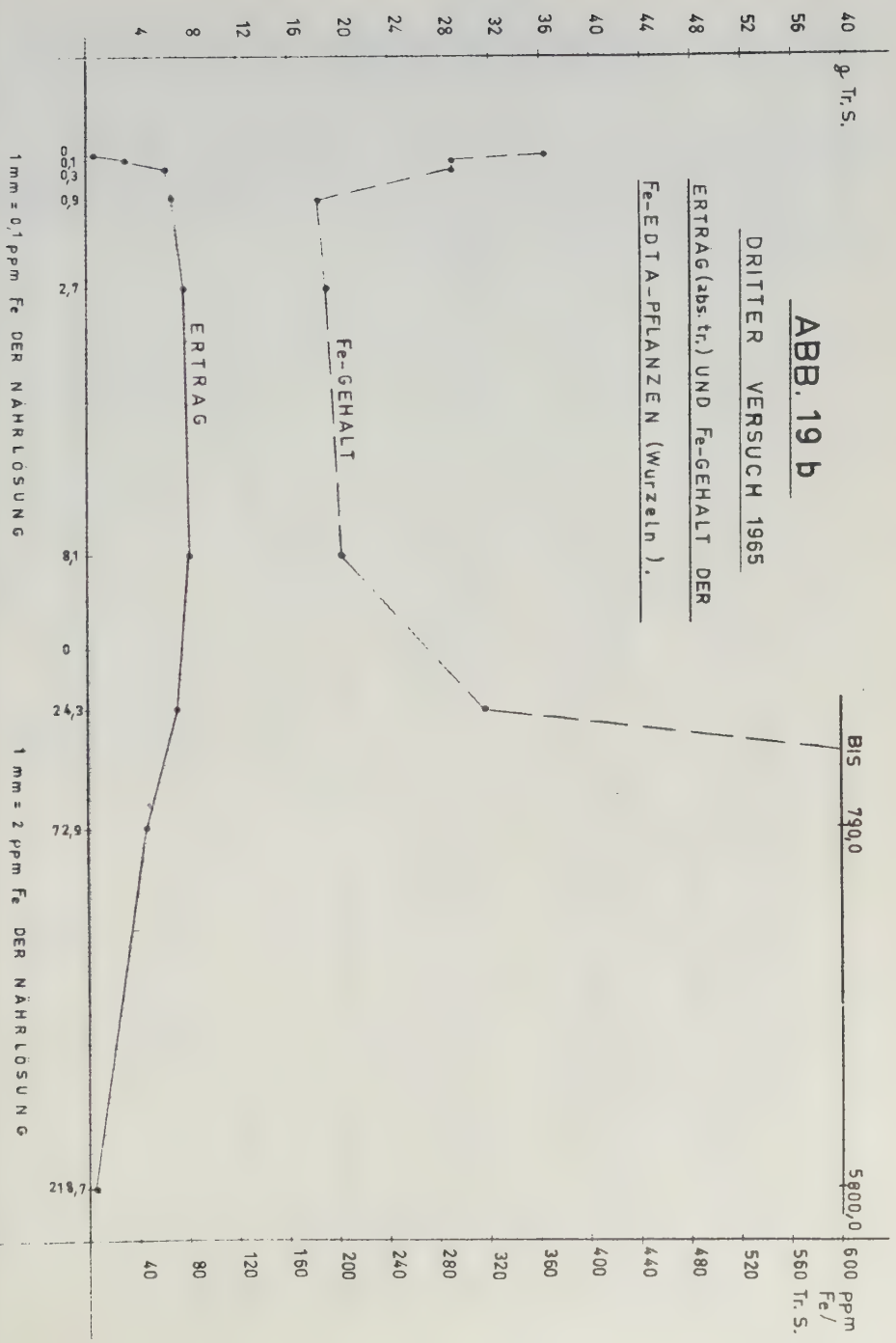


ABB. 19 b

DRITTER VERSUCH 1965

ERTRAG (abs. tr.) UND Fe-GEHALT DER

Fe-EDTA-PFLANZEN (Wurzeln).



Tab. 25

Dritter Versuch (1965)

Ertrag (frisch und abs. trocken), Eisengehalte und Eisenentzüge
der Fe-EDTA-Maispflanzen.

ppm Fe der Nähr- lö- sung	Ertrag/Gefäß g Frischsub.		Ertrag/Gefäß g abs. Tr.-Sub.				g Fe/g Trockensub.		mg Fe/ Trockensub. je Gefäß	
	Ober. Teile	Mit- tel	Ober. Teile	Mit- tel	Wur- zeln	Mit- tel	Ober. Teile	Wur- zeln	Ober. Teile	Wur- zeln
0	2,0 14,5 3,5 9,0	7,5	1,2 1,7 1,8 1,5	1,55	0,6 0,8 0,5 0,8	0,67	216,0	363,2	0,335	0,243
0,1	48,0 111,5 140,0 82,5	95,5	4,8 10,0 13,0 6,6	8,6	2,4 2,5 4,5 3,0	3,1	79,2	290,0	0,681	0,899
0,3	220,0 191,0 246,5 260,0	229,5	19,2 19,0 21,5 23,0	20,7	5,8 5,4 7,5 6,5	6,3	120,0	291,2	2,484	1,835
0,9	302,0 296,5 355,5 280,0	308,5	32,5 35,0 37,2 29,0	33,4	6,6 7,0 7,2 6,2	6,8	105,6	184,0	3,527	1,251
2,7	427,0 424,5 455,0 490,5	449,0	41,3 48,5 46,5 46,0	45,6	7,3 8,0 7,3 8,5	7,8	72,0	190,0	3,283	1,482
8,1	645,0 440,0 624,0 588,0	574,0	63,0 55,0 70,6 65,0	63,4	7,8 7,2 9,0 8,5	8,1	74,4	202,0	4,717	1,636
24,3	373,5 410,0 441,0 351,0	394,0	42,0 45,8 49,0 45,0	45,4	7,5 7,1 6,8 6,8	7,1	100,8	316,0	4,576	2,244
72,9	254,0 145,0 280,0 255,0	233,5	26,0 12,5 28,5 26,0	23,2	5,5 3,2 5,5 4,6	4,7	158,4	790,0	3,675	3,713
218,7	11,5 2,0 21,0 1,5	9,0	1,8 0,5 2,5 0,3	1,27	0,8 0,1 1,0 0,1	0,5	1428,0	5800,0	1,814	2,900

Bei den Erträgen sind von jeder Versuchsreihe
die Einzelwerte und die Mittelwerte angeführt.

ABB. 20 a

DRITTER VERSUCH 1965

ERTRAG (abs. tr.) UND Fe-GEHALT DER

EISENCITRAT-PFLANZEN (Spross).

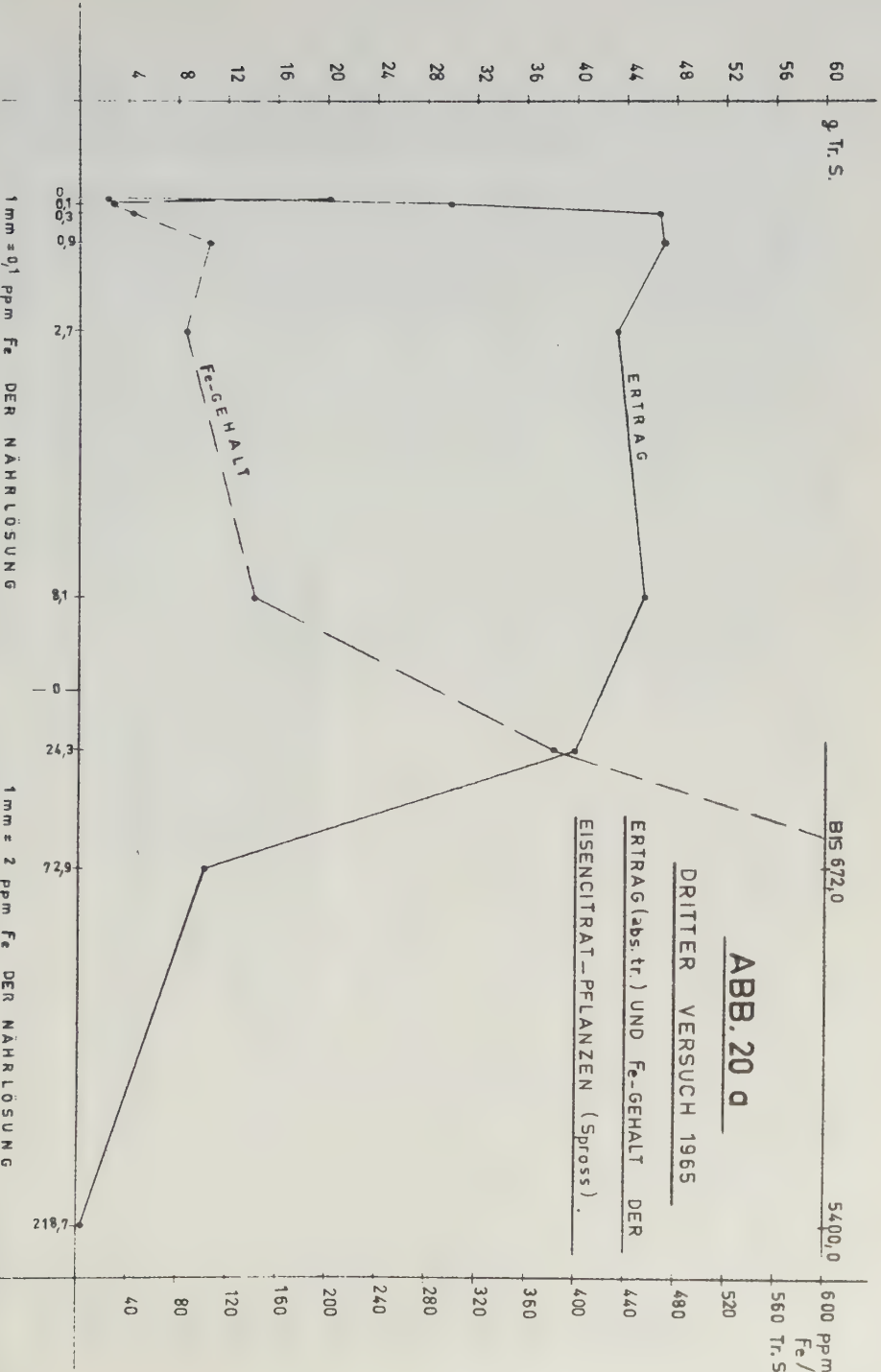
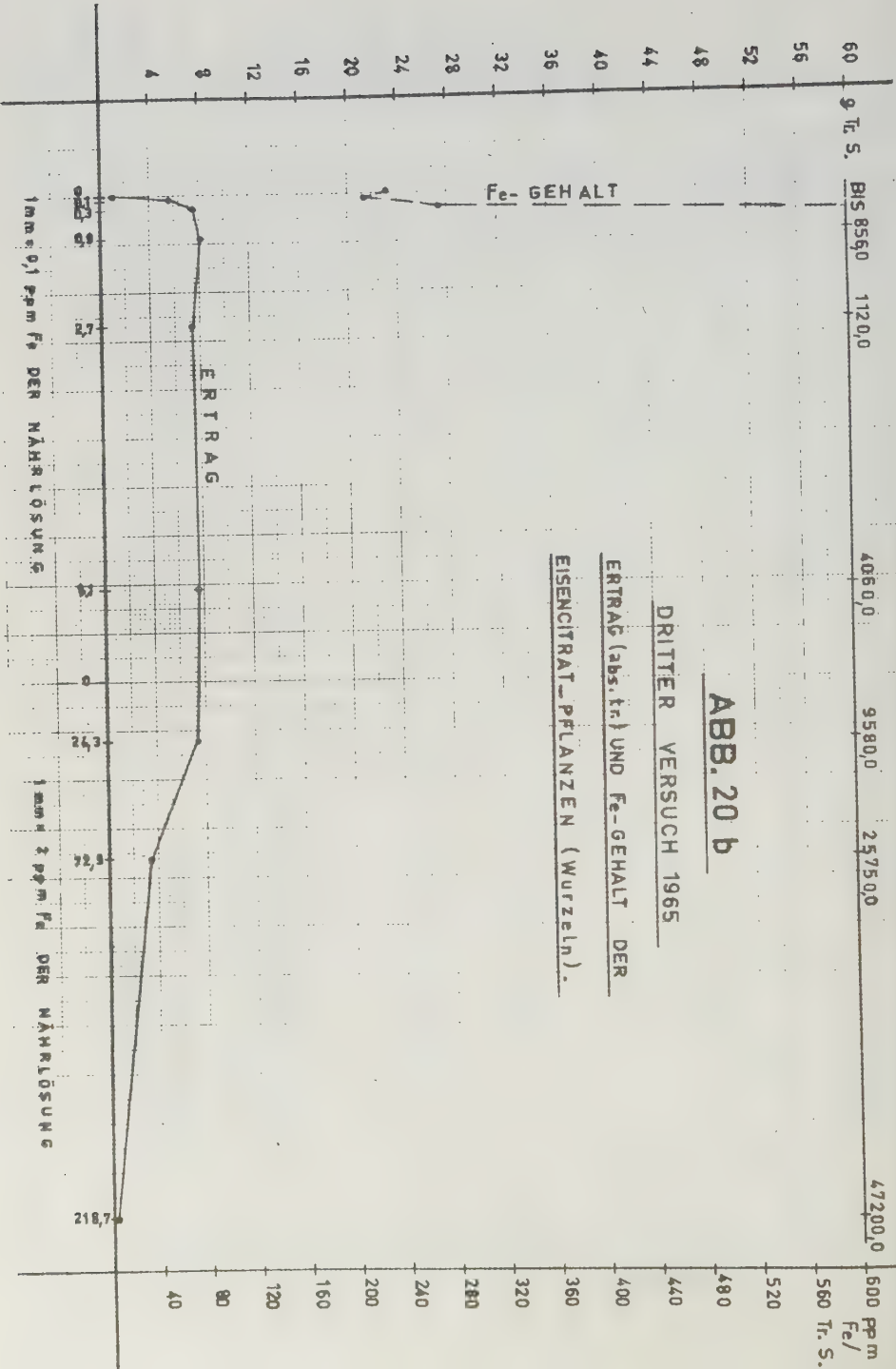


ABB. 20 b

DRITTER VERSUCH 1965

ERTRAG (abs. tn) UND Fe-GEHALT DER

EISENCITRAT-PFLANZEN (Wurzeln) -



Tab. 26

Dritter Versuch (1965)

Ertrag (frisch und abs. trocken), Eisengehalte und Eisenentzüge der Eisencitrat-Maispflanzen.

ppm Fe der Nähr- lö- sung	Ertrag/Gefäß g Frischsub.		Ertrag/Gefäß g abs. Tr.-Sub.				Fe/g Trockensub.		mg Fe/ Trockensub. je Gefäß	
	Ober. Teile	Mit- tel	Ober. Teile	Mit- tel	Wur- zeln	Mit- tel	Ober. Teile	Wur- zeln	Ober. Teile	Wur- zeln
0	16,5 14,0 36,2 18,0	21,2	2,0 2,0 3,2 2,0	2,3	1,0 1,5 1,0 1,1	1,15	200,7	230,0	0,462	0,265
0,1	315,0 240,0 298,5 282,0	286,0	32,0 27,5 31,5 28,2	29,8	6,2 5,0 6,0 5,5	5,7	27,6	214,0	0,822	1,220
0,3	385,5 412,0 382,0 461,0	410,5	45,0 50,5 42,0 49,0	46,6	8,0 7,2 7,0 8,2	7,6	43,2	274,8	2,013	2,088
0,9	355,0 340,0 410,0 421,5	382,0	42,0 41,0 52,5 52,1	46,9	8,0 8,5 7,5 8,0	8,0	105,6	856,0	4,953	6,848
2,7	406,5 345,0 360,0 419,0	383,0	51,0 36,0 36,0 50,0	43,2	8,0 7,0 7,0 7,5	7,4	86,0	1120,0	3,715	8,288
8,1	366,5 339,5 462,5 411,5	395,0	38,2 38,8 54,5 49,0	45,4	6,8 7,0 9,5 7,0	7,6	141,6	4060,0	6,429	30,856
24,3	328,5 374,5 372,0 345,0	355,0	36,0 46,0 36,3 40,3	39,8	6,8 7,5 7,5 7,6	7,3	381,6	9580,0	15,188	69,934
72,9	80,0 68,0 84,5 126,0	89,6	9,2 7,5 9,0 15,1	10,2	3,5 3,0 3,2 4,2	3,5	672,0	25750,0	6,854	90,125
218,7	0,5 0,5 0,7 0,5	0,55	0,4 0,3 0,5 0,5	0,4	0,18 0,20 0,20 0,28	0,21	5400,0	47200,0	2,160	9,912

Bei den Erträgen sind von jeder Versuchsreihe die Einzelwerte und die Mittelwerte angeführt.

II.II Die Vegetationsperiode 1966

In dieser Vegetationsperiode wurden zwei weitere Wasserkultur-Versuche mit den gleichen Eisenformen angelegt, zur weiteren Erklärung des Eiseneinflusses auf den Ertrag und den Eisengehalt der Maispflanzen. Es wurden die gleichen Arbeitsverfahren wie bei der ersten Vegetation angewandt.

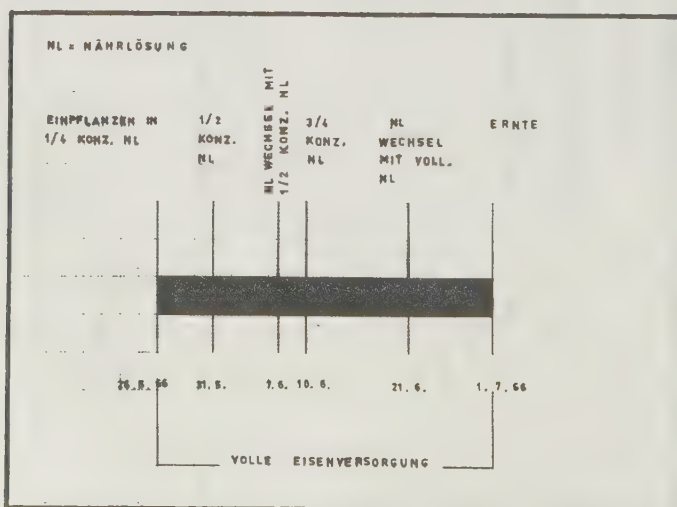
1. Erster Versuch.

Die Eisenkonzentrationen wurden zwischen den sehr niedrigen und den sehr hohen Konzentrationen der Versuche des Vorjahres gehalten.

Die am 26.5.1966 in die 1/4 konz. Nährlösung umgesetzten Maiskeimlinge wurden am gleichen Tag mit allen drei Eisenformen in folgender Steigerung behandelt:

0; 0,1; 0,2; 0,4; 0,8; 1,6; 3,2; 6,4; 12,8; 25,6; 51,2 und 102,4 ppm Fe in der Nährlösung.

Das folgende Schema gibt weitere Einzelheiten über den Versuchsverlauf:



1.1. Versuchsbeobachtungen.

Die Pflanzen zeigten das erwartete Wachstum. Die Höchsterträge wurden durch etwa die gleichen Eisenkonzentrationen wie im Vorjahr erzielt. Auch die toxische Wirkung hoher Eisenkonzentrationen und ebenfalls die schwache Ertragswirkung niedriger Eisenchelatkonzentrationen konnten erneut beobachtet werden. Wie im Vorjahr wurden beim Wechsel der Nährlösungen pH-Wert und Eisengehalt ermittelt. Das Erntegut wurde ebenfalls der gleichen Behandlung unterzogen.

1.2. Versuchsergebnisse.

- a) Der pH-Wert der Nährlösung (Tab. 27) sinkt durch die unterschiedliche Ionen-Aufnahme während des Maiswachstums auch in diesem Versuch ab. Trotz der gehemmten Ionenaufnahme (durch Wachstumsdepression) bei den höheren Konzentrationen von Eisenchlorid, setzte die Anwesenheit größerer Mengen dieses Salzes den pH-Wert der Nährlösung stark herab, wie schon im dritten Versuch der ersten Vegetationsperiode festgestellt wurde.
- b) Die Eisenbestimmungen in den gewechselten Nährlösungen (Tab. 28) ließen einen ähnlichen Rhythmus der Eisenaufnahme durch die Maispflanzen, wie er in den vorherigen Versuchen erhalten wurde, erkennen.
- c) Die Tabellen 29, 30 und 31 stellen die Erträge und die Eisengehalte der Maispflanzen dar. Die höchsten Erträge (oberirdische Teile und Wurzeln) traten bei den gleichen Konzentrationen der drei Eisenformen auf, die schon in den vorherigen Versuchen betrachtet wurden. Auch in diesem Versuch wurde eine starke Ertragsdepression der oberirdischen Teile und Wurzeln bei den hohen Konzentrationen aller drei Eisenformen festgestellt.
- d) Auch hier war der Eisengehalt der ohne Eisen ernährten Pflanzen höher, als der der Pflanzen mit dem höchsten Ertrag durch die drei Eisenformen (Abb. 21a, 22a und 23a). Der Eisengehalt der mit größeren Eisenmengen versorgten Pflanzen stieg an. Bei Eisen-EDTA stieg im Fe-Konzentrationsbereich von 3,2-6,4 ppm Fe der Pflanzenertrag an, der Eisengehalt

dieser Pflanzen dagegen blieb unverändert. Ähnliche Ergebnisse brachte der dritte Versuch in der ersten Vegetationsperiode.

- e) Die Abbildungen 21b, 22b und 23b stellen die Wurzelerträge und die Eisengehalte der Wurzeln dar. Die Wurzeln beim höchsten Ertrag enthielten weniger Eisen als die Wurzeln der ohne Eisen ernährten Pflanzen. Der Eisengehalt steigt aber sonst mit den steigenden zugeführten Eisenmengen an. Wie schon in den vorherigen Versuchen festgestellt, absorbierten die Maiswurzeln größere Mengen von Eisen in Eisenchlorid- und Eisencitrat-Formen als in Eisen-EDTA-Form.

Tab. 27
Erster Versuch (1966)
pH-Werte der Nährlösungen.

Fe-Form	ppm Fe der Nährlösung zugesetzt	7.6.1966	21.6.1966	1.7.1966
Fe-Chlorid	0	7,2	7,4	7,0
	0,1	4,3	3,8	3,7
	0,2	4,1	3,9	3,8
	0,4	3,9	4,5	3,7
	0,8	3,9	4,0	3,7
	1,6	3,6	4,0	3,5
	3,2	3,4	3,8	3,4
	6,4	3,4	3,7	3,4
	12,8	3,2	3,5	3,3
	25,6	3,1	3,2	3,1
	51,2	2,9	3,0	3,0
	102,4	2,6	2,8	2,8
Fe-Chelat	0	7,2	7,9	7,3
	0,1	7,1	3,9	4,5
	0,2	5,2	3,9	3,7
	0,4	5,1	4,0	3,7
	0,8	4,6	4,2	3,9
	1,6	3,8	3,7	3,6
	3,2	3,1	3,5	3,7
	6,4	4,1	4,9	4,7
	12,8	5,0	5,6	4,9
	25,6	6,8	6,6	6,6
	51,2	6,8	7,0	6,7
	102,4	6,9	6,3	4,0
Fe-Citrat	0	7,0	6,8	7,0
	0,1	6,3	4,2	3,7
	0,2	5,3	4,2	3,7
	0,4	5,1	3,9	3,6
	0,8	4,8	3,9	3,5
	1,6	4,5	3,9	3,5
	3,2	4,3	3,9	3,6
	6,4	3,9	4,0	3,6
	12,8	4,0	3,9	3,8
	25,6	4,7	4,2	3,8
	51,2	6,3	5,1	4,7
	102,4	7,2	7,0	7,0

Tab. 28

Erster Versuch (1966)

Eisengehalt der Nährlösung zu verschiedenen Zeiten.

Fe-Form	ppm Fe der Nährlösung zugesetzt	ppm Fe in der Nährlösung gemessen am		
		7.6.1966	21.6.1966	1.7.1966
Fe-Chlorid	0	0,03	0,03	0,04
	0,1	0,04	0,045	0,03
	0,2	0,05	0,09	0,07
	0,4	0,07	0,11	0,10
	0,8	0,08	0,12	0,09
	1,6	0,55	0,61	0,60
	3,2	1,3	2,1	2,0
	6,4	2,1	4,7	3,8
	12,8	4,4	7,5	7,1
	25,6	7,3	16,1	18,3
	51,2	19,7	23,9	34,6
	102,4	27,5	37,0	56,8
Fe-Chelat	0	0,03	0,03	0,03
	0,1	0,05	0,05	0,05
	0,2	0,06	0,06	0,05
	0,4	0,087	0,11	0,09
	0,8	0,42	0,58	0,06
	1,6	0,85	0,96	0,90
	3,2	1,8	1,9	1,9
	6,4	4,6	4,9	4,8
	12,8	7,8	9,1	7,9
	25,6	12,6	17,1	17,0
	51,2	31,3	36,7	39,3
	102,4	56,5	72,3	79,8
Fe-Citrat	0	0,04	0,03	0,03
	0,1	0,03	0,04	0,03
	0,2	0,045	0,05	0,04
	0,4	0,075	0,078	0,08
	0,8	0,095	0,10	0,10
	1,6	0,60	0,81	0,72
	3,2	1,2	1,9	2,0
	6,4	2,4	3,1	2,9
	12,8	4,8	7,6	6,3
	25,6	7,0	19,1	17,8
	51,2	20,1	26,2	39,5
	102,4	34,5	51,3	68,9

ABB. 21 a

ERSTER VERSUCH 1966

ERTRAG (abs. tr.) UND Fe-GEHALT DER

EISENCHLORID-PFLANZEN (Spröss.)

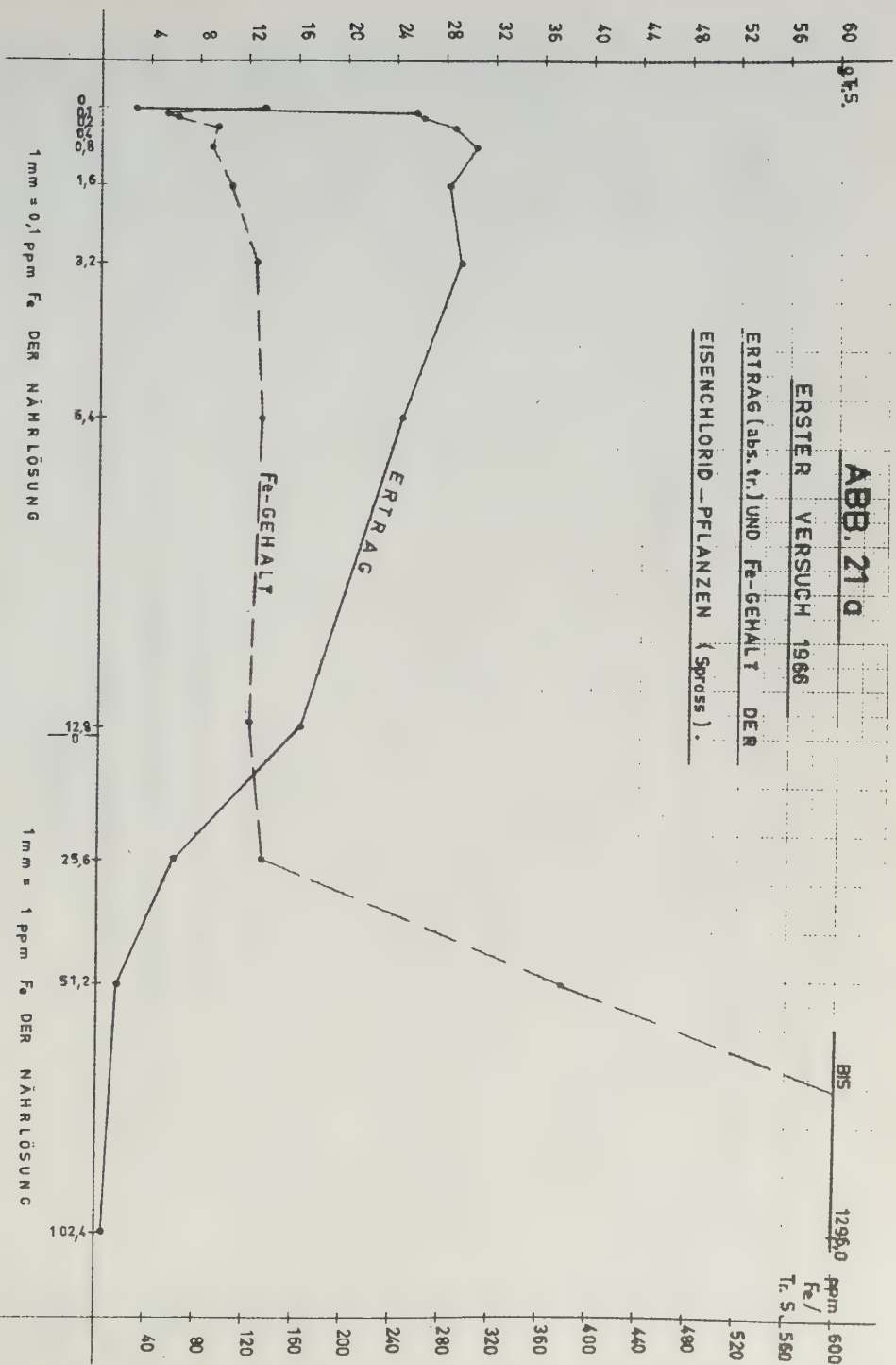
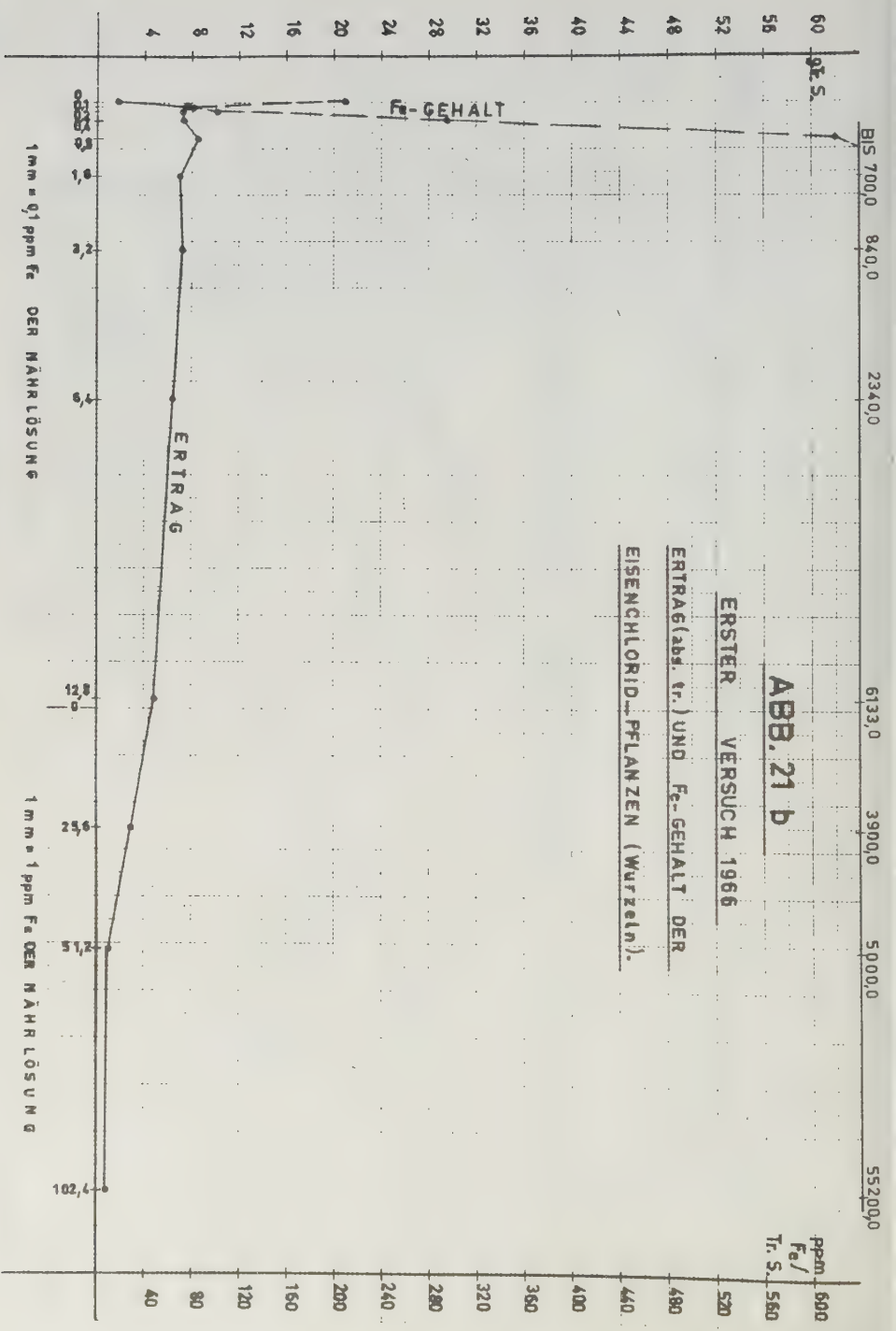


ABB. 21 b

ERSTER VERSUCH 1966

ERTRAG (abs. Gr.) UND Fe-GEHALT DER
EISENCHLORID-PFLANZEN (Wurzeln).



ppm
Fe/
Tr.S. 560

Erster Versuch (1966)

Ertrag (frisch und abs. trocken), Eisengehalte und Eisenentzüge
der Eisenchlorid-Maispflanzen.

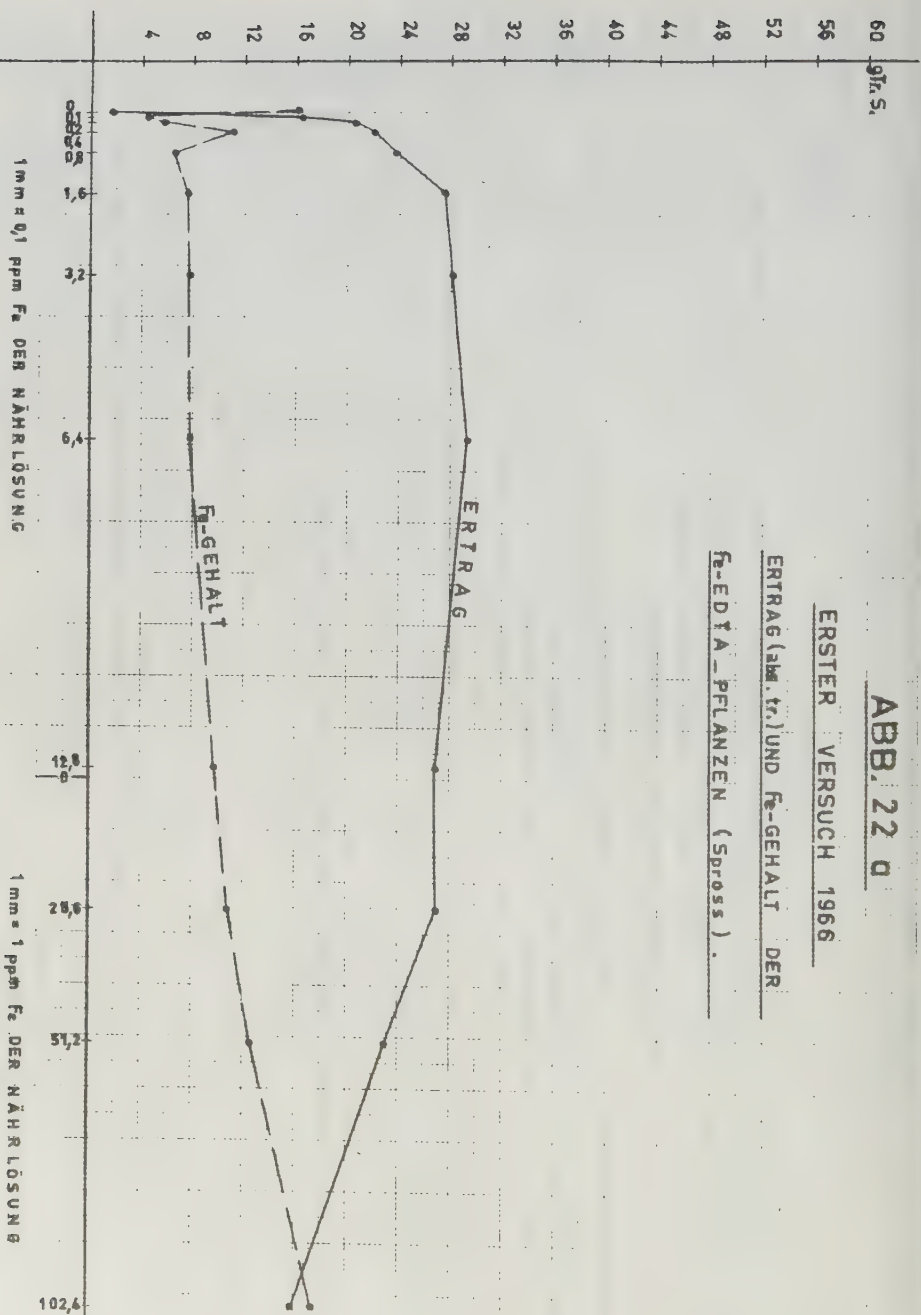
ppm Fe der Nähr- lö- sung	Ertrag/Gefäß g Frischsub.		Ertrag/Gefäß g abs. Tr.-Sub.				g Fe/g Trockensub.		mg Fe/ Trockensub. je Gefäß	
	Ober- Teile	Mit- tel	Ober- Teile	Mit- tel	Wur- zeln	Mit- tel	Ober- Teile	Wur- zeln	Ober- Teile	Wur- zeln
0	7,0 30,5 22,5 30,0	22,5	1,8 3,3 2,7 3,2	2,8	1,2 2,0 1,8 1,7	1,7	132,0	210,0	0,370	0,357
0,1	296,0 320,0 321,0 301,0	309,5	29,1 21,3 29,0 23,1	25,6	8,4 6,9 8,8 6,7	7,7	53,0	81,0	1,357	0,624
0,2	339,0 295,0 315,0 315,0	316,0	27,2 27,8 24,5 25,0	26,1	8,0 7,3 6,8 6,8	7,2	62,0	101,0	1,618	0,727
0,4	307,0 310,0 352,0 342,0	327,0	27,0 30,0 32,0 26,0	28,7	6,5 7,0 7,2 8,3	7,3	94,0	296,0	2,698	2,161
0,8	385,0 411,0 346,0 390,0	383,0	28,0 33,7 31,0 29,0	30,4	8,5 8,5 7,8 8,3	8,3	90,0	620,0	2,736	5,146
1,6	351,0 335,0 355,0 332,0	343,5	28,3 28,8 26,0 30,0	28,3	8,1 7,4 6,2 6,3	7,0	106,0	700,0	3,000	4,900
3,2	340,0 355,0 320,0 335,0	337,5	28,5 30,0 27,4 30,8	29,2	7,2 7,0 6,6 8,2	7,3	126,0	840,0	3,680	6,132
6,4	265,0 205,0 285,0 315,0	267,5	22,0 20,0 27,0 28,8	24,5	5,7 4,9 7,0 7,5	6,3	132,0	2340,0	3,234	14,742
12,8	150,0 160,0 207,0 173,0	172,5	14,5 15,0 19,2 17,0	16,4	4,1 4,3 5,8 4,8	4,8	122,0	6133,0	2,000	29,438
25,6	65,0 60,5 61,8 56,0	60,8	6,8 6,2 6,2 6,2	6,3	3,0 2,8 2,6 2,9	2,8	134,8	3900,0	0,850	10,920
51,2	12,8 18,8 7,0 7,5	11,5	2,0 2,2 1,2 1,4	1,7	1,1 1,3 0,8 0,9	1,0	378,0	5000,0	0,643	5,000
102,4	1,8 1,2 1,8 2,8	1,9	0,5 0,4 0,5 0,9	0,57	0,7 0,7 0,8 1,0	0,8	1296,0	55200,0	0,739	44,160

ABB. 22 a

ERSTER VERSUCH 1966

ERTRAG (abg. Tr.) UND Fe-GEHALT DER

Fe-EDTA-PFLANZEN (Spross) .



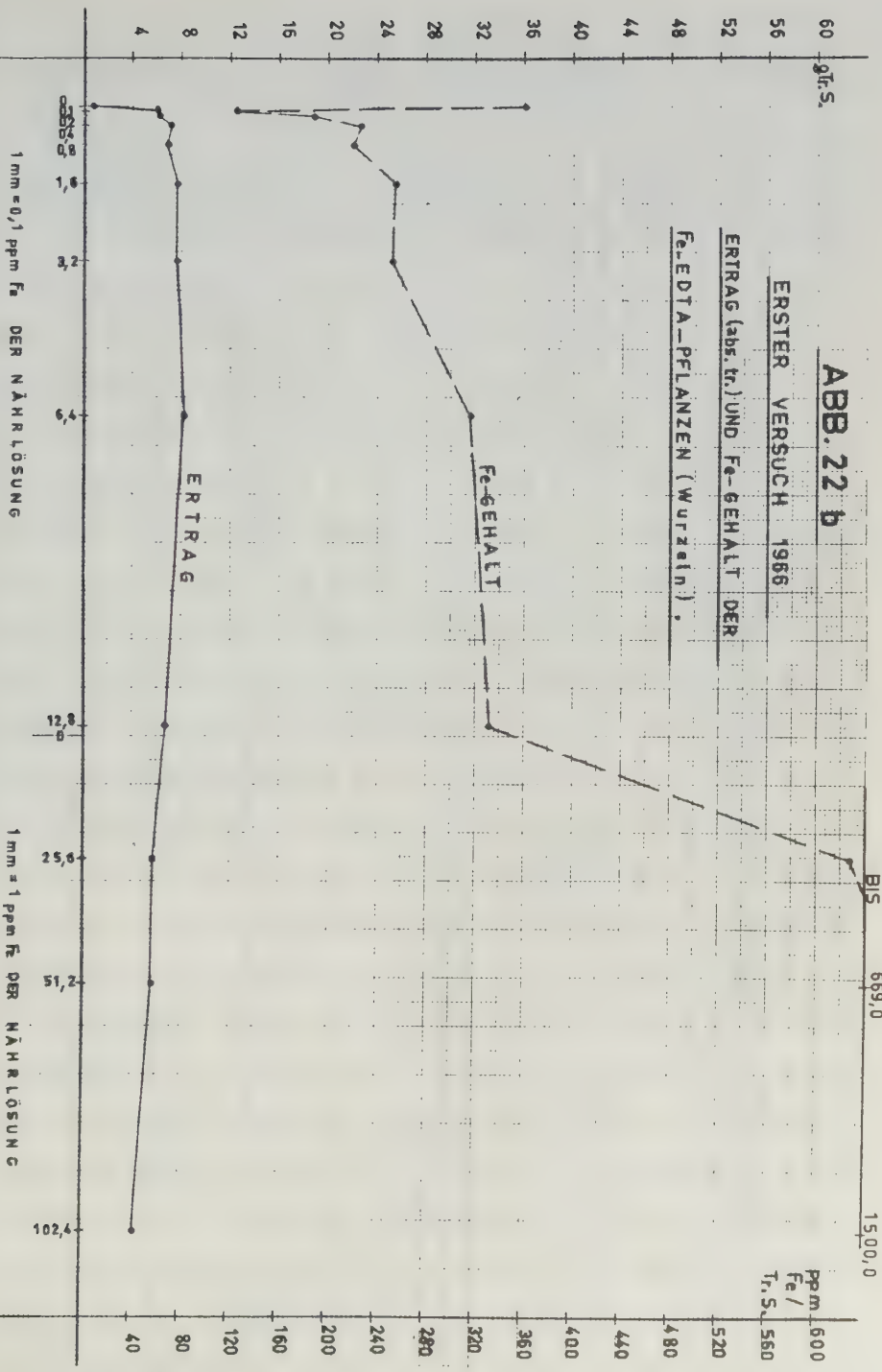
ppm
Fe/
Tr. S. 560

ABB. 22 b

ERSTER VERSUCH 1966

ERTRAG (abs. tn.) UND Fe-GEHALT DER

Fe-EDTA-PFLANZEN (Wurzeln).



Erster Versuch (1966)

Ertrag (frisch und abs. trocken), Eisengehalte und Eisenentzüge
der Fe-EDTA-Maispflanzen.

ppm Fe der Nähr- lö- sung	Ertrag/Gefäß g Frischsub.		Ertrag/Gefäß g abs. Tr.-Sub.				TFe/g Trockensub.		mg Fe Trockensub. je Gefäß	
	Ober- Teile	Mit- tel	Ober- Teile	Mit- tel	Wur- zeln	Mit- tel	Ober- Teile	Wur- zeln	Ober- Teile	Wur- zeln
0	4,7 3,8 5,2 2,2	4,0	1,8 1,3 1,7 1,4	1,6	0,9 0,8 0,9 0,8	0,85	160,0	360,0	0,256	0,306
0,1	247,5 248,0 188,0 197,0	220,5	17,8 18,5 14,0 15,2	16,4	6,0 6,5 5,9 5,1	5,9	44,0	125,0	0,722	0,738
0,2	190,0 264,0 277,5 259,0	248,0	18,2 20,8 22,5 21,0	20,6	6,0 7,5 6,5 4,8	6,2	57,4	188,0	1,182	1,166
0,4	224,0 215,0 278,0 313,0	257,5	20,5 18,0 23,8 26,1	22,1	8,3 6,2 6,8 7,5	7,2	90,0	226,0	1,989	1,627
0,8	291,0 320,0 290,0 294,0	299,0	21,1 22,8 27,5 23,4	23,7	5,5 6,5 8,0 7,1	6,8	66,0	220,0	1,564	1,496
1,6	325,0 314,0 363,0 321,5	331,0	27,2 29,2 26,3 27,3	27,5	7,0 10,0 6,1 7,5	7,7	76,0	254,0	2,090	1,956
3,2	363,0 334,0 301,0 372,0	342,5	29,5 28,3 26,0 28,5	28,1	8,5 7,0 7,5 7,5	7,6	78,0	252,0	2,192	1,915
6,4	372,0 390,0 398,0 352,0	378,0	31,5 28,8 27,0 30,0	29,3	8,3 8,0 9,3 7,1	8,2	78,0	316,0	2,285	2,591
12,8	305,0 325,0 325,0 305,0	315,0	27,0 28,0 27,5 25,2	26,9	7,0 6,5 7,1 6,0	6,7	98,0	332,0	2,636	2,224
25,6	257,0 333,0 290,0 255,0	284,0	27,8 29,1 28,2 23,0	27,0	6,1 6,3 5,5 5,4	5,8	108,0	628,0	2,916	3,642
51,2	260,0 282,0 268,0 238,0	262,0	23,1 25,0 23,5 20,2	23,0	5,8 5,8 6,3 5,0	5,7	126,0	669,0	2,898	3,813
102,4	162,0 176,0 202,0 230,0	192,5	13,5 15,4 17,8 16,5	15,8	4,8 4,7 4,0 3,8	4,3	174,0	1500,0	2,749	6,450

ABB. 23 d

ERSTER VERSUCH 1966

ERTRAG (abs. tr.) UND Fe-GEHALT DER
EISENCITRAT - PFLANZEN (Spross) .

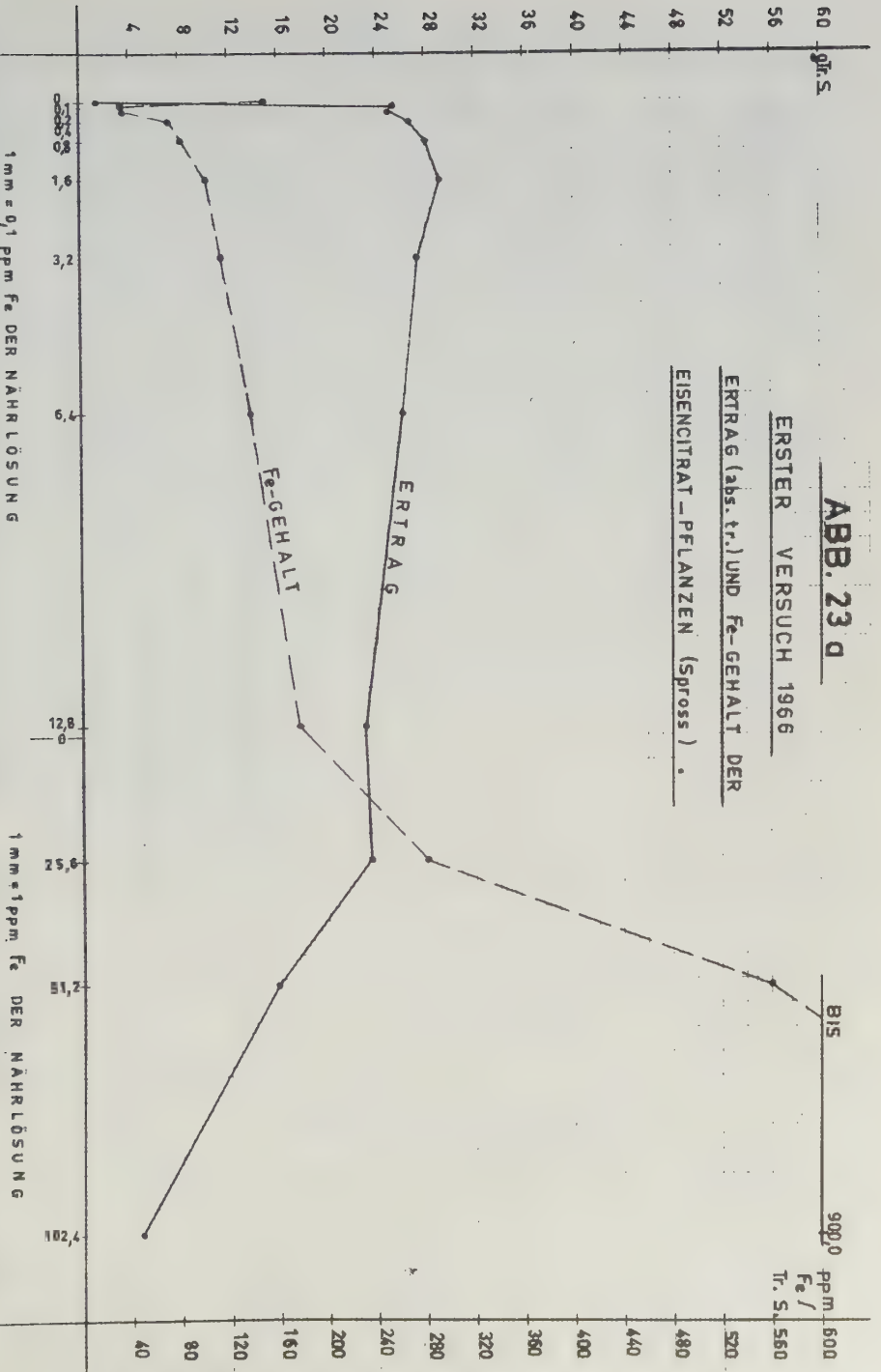
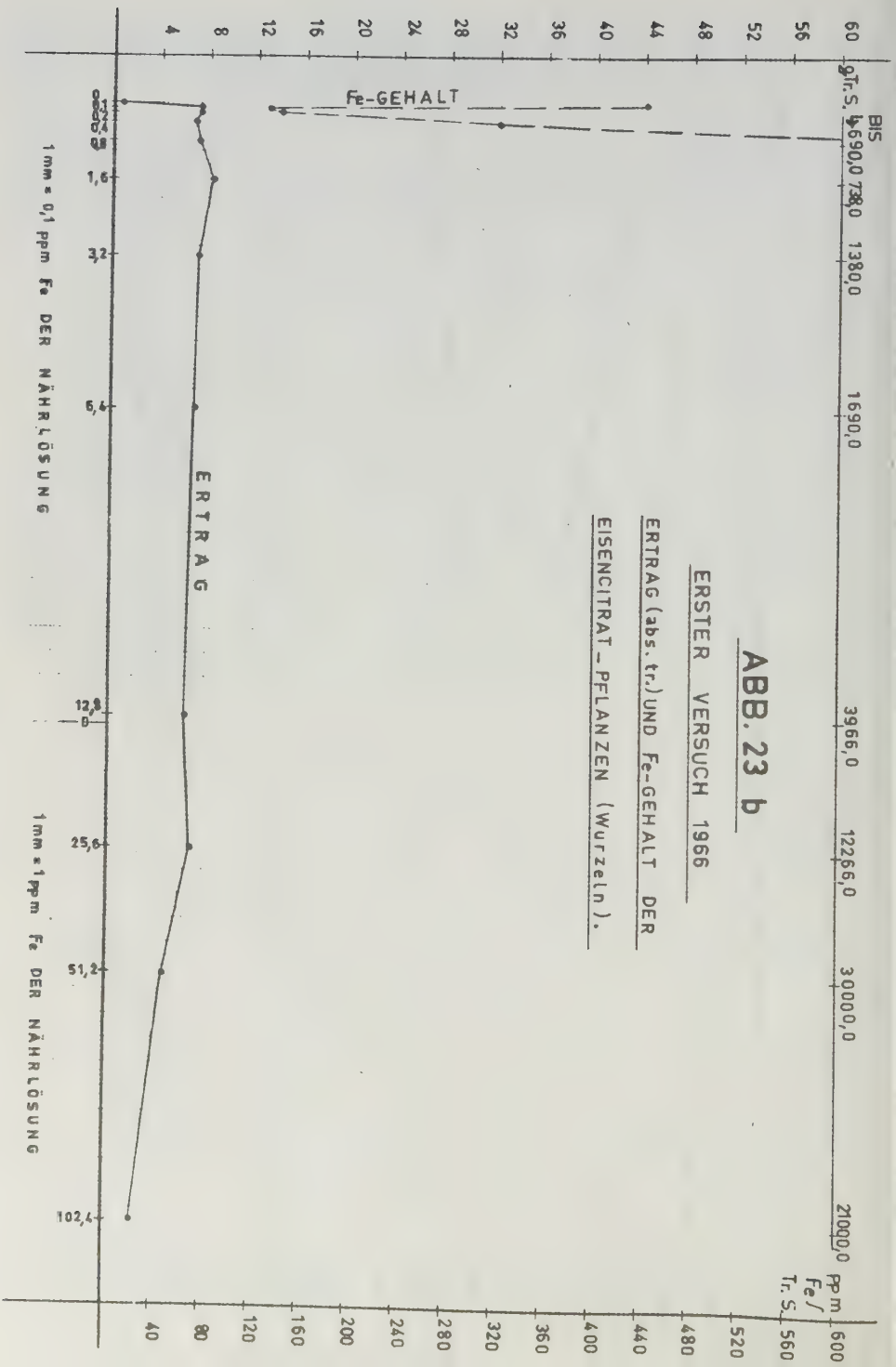


ABB. 23 b

ERSTER VERSUCH 1966

ERTRAG (abs. tr.) UND Fe-GEHALT DER
EISENCITRAT - PFLANZEN (Wurzeln).



Tab. 31

Erster Versuch (1966)

Ertrag (Frucht und abs. trocken), Eisengehalte und Eisenentzüge der Eisencitrat-Eisbpflanzen.

ppm Fe der Nähr- lösung	Ertrag/Gefäß g Frischsub.		Ertrag/Gefäß g abs. Fr.-Sub.				g Fe/g Trockensub.		mg Fe/ Trockensub. je Gefäß	
	Ober- Teile	Mit- tel	Ober- Teile	Mit- tel	Wur- zeln	Mit- tel	Ober- Teile	Wur- zeln	Ober- Teile	Wur- zeln
0	5,0 3,0 7,0 3,0	5,0	1,3 1,2 1,3 1,8	1,4	0,8 0,6 0,8 0,8	0,75	150,0	440,0	0,210	0,330
0,1	277,0 248,0 275,0 205,0	266,0	26,1 25,0 24,2 26,2	25,4	6,7 7,8 8,0 6,8	7,3	33,0	130,0	0,838	0,949
0,2	235,0 266,0 293,0 285,0	295,5	28,0 23,0 24,3 24,1	25,1	7,0 7,3 7,0 7,3	7,2	35,0	140,0	0,879	1,008
0,4	290,0 314,0 332,0 296,0	306,0	25,5 27,1 27,6 26,5	26,7	5,8 7,0 7,1 7,1	6,8	72,0	320,0	1,922	2,176
0,6	300,0 307,0 302,0 338,0	312,0	24,0 33,5 26,3 26,3	28,0	7,5 6,8 7,1 6,9	7,1	82,0	690,0	2,296	4,899
1,6	360,0 374,0 363,0 351,0	357,0	29,0 29,2 30,2 28,2	29,2	8,9 8,8 8,5 7,1	8,3	102,0	738,0	2,978	6,125
3,2	297,0 320,0 324,0 315,0	314,0	27,2 27,2 26,7 23,3	27,4	7,5 6,0 7,0 6,3	7,2	114,0	1380,0	3,124	9,936
6,4	260,0 345,0 277,0 340,0	305,5	22,0 29,5 24,2 28,8	26,1	5,3 8,0 6,3 7,8	6,9	138,0	1690,0	5,602	11,661
12,8	308,0 282,0 297,0 255,0	285,5	26,2 25,5 18,3 21,8	23,0	7,0 6,0 4,5 6,1	6,4	176,0	3966,0	4,048	25,382
25,6	277,0 244,0 284,0 312,0	279,5	24,5 20,8 25,1 23,5	23,5	5,0 6,6 6,9 6,0	6,9	200,0	12266,0	6,580	84,635
51,2	156,0 206,0 168,0 160,0	160,5	13,0 18,8 16,6 15,0	15,3	3,8 5,0 5,0 4,9	4,8	360,0	30000,0	8,904	144,000
102,4	45,0 56,0 54,0 33,3	46,8	4,5 5,8 5,8 3,2	4,8	2,1 2,6 1,3 3,0	2,25	900,0	21000,0	4,320	47,250

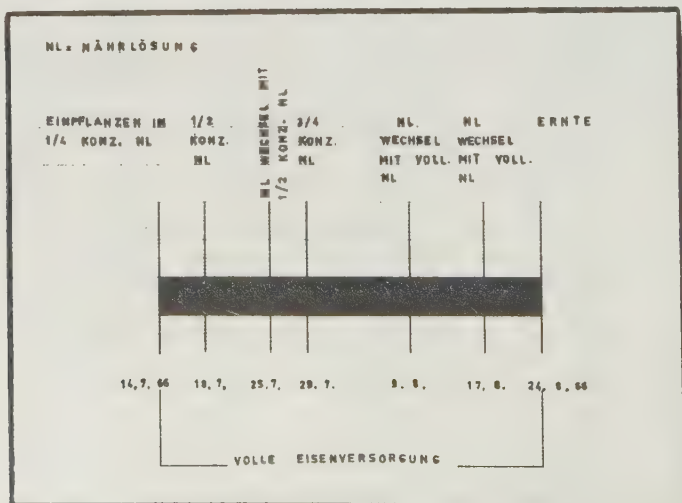
2. Zweiter Versuch.

Das Absinken des pH-Wertes der Nährlösung während der Wachstumsperiode durch eine bevorzugte Aufnahme von Kationen regte dazu an, diesen Faktor mit seinen eventuellen Auswirkungen auf das Wachstum auszuschließen. In diesem Versuch wurde deshalb der pH-Wert der Nährlösung während der Versuchsdauer durch Titration mit NaOH-Lösung, in Anwesenheit des Indikators "Bromthymolblau" ($\text{pH}=6,0-7,6$), ständig um den Neutralpunkt gehalten.

Durchführung des Versuches.

Die Pflanzen dieses Versuches erfuhren die gleiche Steigerung der Eisenkonzentration wie im ersten Versuch dieser Vegetationsperiode. Dieser forderte bereits vor dem Umpflanzen der Maiskeimlinge eine Neutralisation der durch die Anwendung größerer Mengen Eisenchlorid in der Nährlösung verursachten Azidität. Die am 14.7.1966 in 1/4 konz. Nährlösung umgepflanzten Maiskeimlinge wurden am gleichen Tag mit der im vorigen Versuch beschriebenen Steigerung der Fe-Konzentration aller drei Eisenformen versehen. Der pH-Wert der Nährlösung aller Gefäße wurde fast jeden Tag durch Titration auf den Neutralpunkt eingestellt.

Das folgende Schema gibt weitere Einzelheiten über den Versuchsverlauf.



Bei jedem Nährlösungswechsel wurde die Azidität der hohen Fe-Chloridmengen neutralisiert und der Eisengehalt der gewechselten Nährlösung bestimmt.

2.1. Versuchsbeobachtungen.

Die Maispflanzen dieses Versuches, die in neutralen Nährlösungen wuchsen, ergaben andere Wachstumsverhältnisse als im vorigen Versuch.

- a) Die Ertragskurve der Maispflanzen bei Eisenchloridbehandlung (Abb. 24) zeigt einen Ertragsabfall bei 1,6 ppm Fe in der Nährlösung. Danach stieg sie wieder an. Eine schwache Ertragsdepression konnte bei der letzten Eisenstufe dieser Behandlung beobachtet werden.
- b) Die Pflanzen der Eisenchelat- und Eisencitrat-Behandlungen (Abb. 25 und 26) zeigten jeweils eine typische Ertragskurve mit einer schwachen Ertragsdepression in den beiden letzten Eisenstufen.

2.2. Versuchsergebnisse.

Die neutrale Reaktion der Nährlösung führte zur Entstehung besonderer Merkmale in der Eisenernährung:

- a) Die Eisengehalte der gewechselten Nährlösungen (Tab. 32) ergaben einen klaren Einfluß der neutralen Reaktion auf die Löslichkeit, bzw. Verfügbarkeit der zugeführten Eisenformen. Die niedrige Eisenkonzentration der Nährlösung bei der Eisenchlorid-Behandlung gibt einen Beweis für die Ausfällung des Eisens als Hydroxyd, verursacht durch die Neutralisation mit NaOH-Lösung. Die hohe Stabilitätskonstante des Fe-EDTA schützte gegen Ausfällung im neutralen Bereich der Nährlösung. Die Stabilität der Eisencitratverbindung war niedriger gegenüber der Eisenchelatverbindung aber viel höher als von Eisenchlorid-Salz.
- b) Das Trockengewicht der Maispflanzen bei Eisenchlorid-Behandlung (Tab. 33) läßt den schon beobachteten Abfall im Ertrag bei 1,6 ppm Fe in der Nährlösung, nach der Ausfällung des Eisens durch die Neutralisation deutlich erkennen. Danach stieg der Ertrag bis zur Eisenstufe 25,6 ppm Fe an. Ab dieser Eisenstufe sank das Trockengewicht langsam wieder ab.

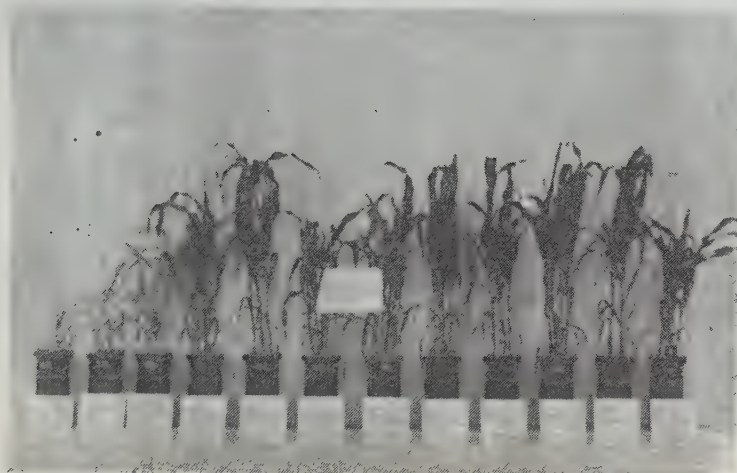
Die Eisenchelatbehandlung (Tab. 34) ergab den höchsten Ertrag bei der Eisenstufe 25,6 ppm Fe und die Eisencitratbehandlung (Tab. 35) bei der Eisenstufe 6,4 ppm Fe in der Nährlösung.

- c) Die Untersuchung der Versuchspflanzen (oberirdische Teile) (Abb. 27a, 28a und 29a) ergab, daß der Eisengehalt der Pflanzen des höchsten Ertrages bei allen drei Behandlungen kleiner war, als der der ohne Eisen ernährten Pflanzen. Durch die weitere Steigerung der Eisenkonzentration der Nährlösung in den drei Formen, stieg der Eisengehalt ebenso wieder an.
- d) Die Untersuchung der Wurzeln (Abb. 27b, 28b und 29b) ergab trotz Neutralisation der in der Nährlösung entstandenen Azidität, daß der Eisengehalt durch die steigenden Eisenkonzentrationen in Eisenchlorid- und Eisencitrat-Form sehr stark und in der Eisenchelat-Form langsamer anstieg. Das beweist, daß die Maiswurzeln größere Mengen vom Eisen in Eisenchlorid- und Eisencitrat-Formen zu absorbieren vermögen als in Eisenchelat-Form.

Abb. 24

Zweiter Versuch (1966)

Steigende Konzentrationen von Fe-Chlorid.



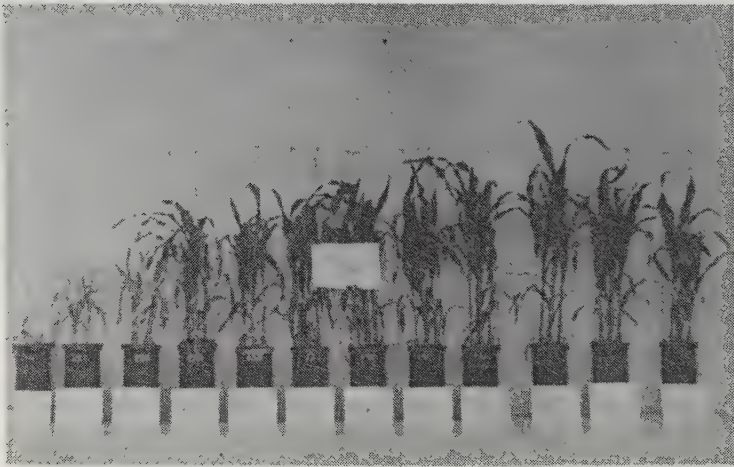
Ein Ertragsabfall bei der Eisenstufe 1,6 ppm Fe
der neutralisierten Nährlösung.

1.	Gefäß	ohne	Fe
2.	"	0,1 ppm	"
3.	"	0,2	" "
4.	"	0,4	" "
5.	"	0,8	" "
6.	"	1,6	" "
7.	"	3,2	" "
8.	"	6,4	" "
9.	"	12,8	" "
10.	"	25,6	" "
11.	"	51,2	" "
12.	"	102,4	" "

Abb. 25

Zweiter Versuch (1966)

Steigende Konzentrationen von Fe-EDTA.

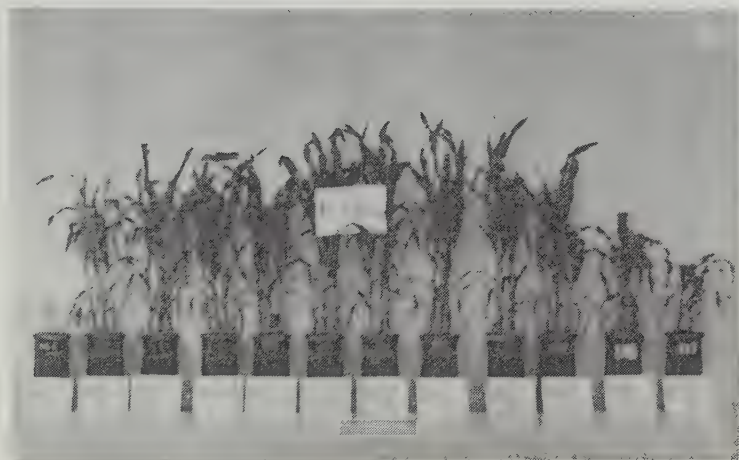


1.	Gefäß	ohne	Fe
2.	"	0,1 ppm	"
3.	"	0,2	" "
4.	"	0,4	" "
5.	"	0,8	" "
6.	"	1,6	" "
7.	"	3,2	" "
8.	"	6,4	" "
9.	"	12,8	" "
10.	"	25,6	" "
11.	"	51,2	" "
12.	"	102,4	" "

Abb. 26

Zweiter Versuch (1966)

Steigende Konzentrationen von Fe-Citrat.



1.	Gefäß	ohne	Fe
2.	"	0,1 ppm	"
3.	"	0,2	" "
4.	"	0,4	" "
5.	"	0,8	" "
6.	"	1,6	" "
7.	"	3,2	" "
8.	"	6,4	" "
9.	"	12,8	" "
10.	"	25,6	" "
11.	"	51,2	" "
12.	"	102,4	" "

Tab. 32

Zweiter Versuch (1966)

Eisengehalt der Nährlösung zu verschiedenen Zeiten.

Fe-Form	ppm Fe der Nährlösung zugesetzt	ppm Fe in der Nährlösung gemessen am			
		25.7.66	9.8.66	17.8.66	24.8.66
Fe-Chlorid	0	0,04	0,05	0,05	0,04
	0,1	0,04	0,05	0,04	0,043
	0,2	0,06	0,056	0,043	0,05
	0,4	0,06	0,043	0,04	0,05
	0,8	0,04	0,07	0,086	0,096
	1,6	0,2	0,22	0,16	0,20
	3,2	0,13	0,37	0,33	0,41
	6,4	0,23	0,95	0,7	0,83
	12,8	1,2	2,5	1,8	2,2
	25,6	4,1	6,0	4,0	3,6
	51,2	7,8	9,0	10,3	11,5
	102,4	15,3	18,0	16,5	14,5
Fe-Chelat	0	0,04	0,05	0,04	0,05
	0,1	0,04	0,056	0,043	0,043
	0,2	0,04	0,08	0,073	0,09
	0,4	0,09	0,13	0,13	0,10
	0,8	0,56	0,60	0,30	0,36
	1,6	0,49	1,03	0,7	0,83
	3,2	1,9	2,4	1,32	1,86
	6,4	2,9	4,3	3,5	4,8
	12,8	6,7	9,3	9,6	10,5
	25,6	13,4	16,8	18,6	18,8
	51,2	33,3	38,7	39,0	50,7
	102,4	66,3	71,0	66,0	98,0
Fe-Citrat	0	0,04	0,05	0,04	0,04
	0,1	0,05	0,066	0,043	0,043
	0,2	0,06	0,066	0,053	0,056
	0,4	0,09	0,07	0,06	0,073
	0,8	0,15	0,22	0,1	0,14
	1,6	0,19	0,29	0,2	0,31
	3,2	0,5	0,63	0,25	0,44
	6,4	1,5	2,0	1,15	1,7
	12,8	4,3	4,8	5,0	6,3
	25,6	11,6	14,2	13,8	12,4
	51,2	20,3	27,0	25,7	39,3
	102,4	52,0	59,0	56,7	72,5

ABB. 27 a

ZWEITER VERSUCH 1966

ERTRAG (abs.tr.) UND Fe-GEHALT DER
EISENCHLORID-PFLANZEN (Spross).

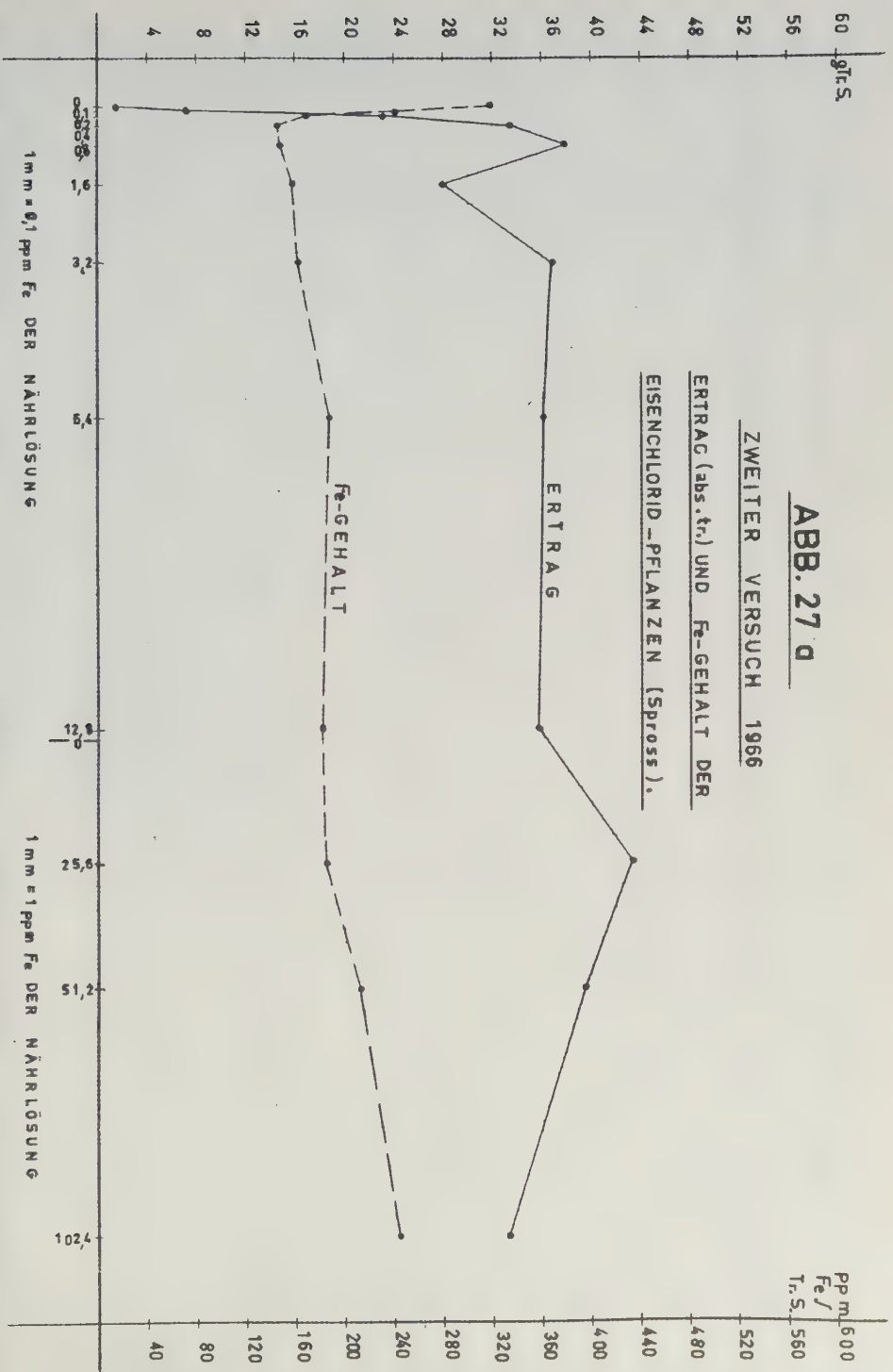
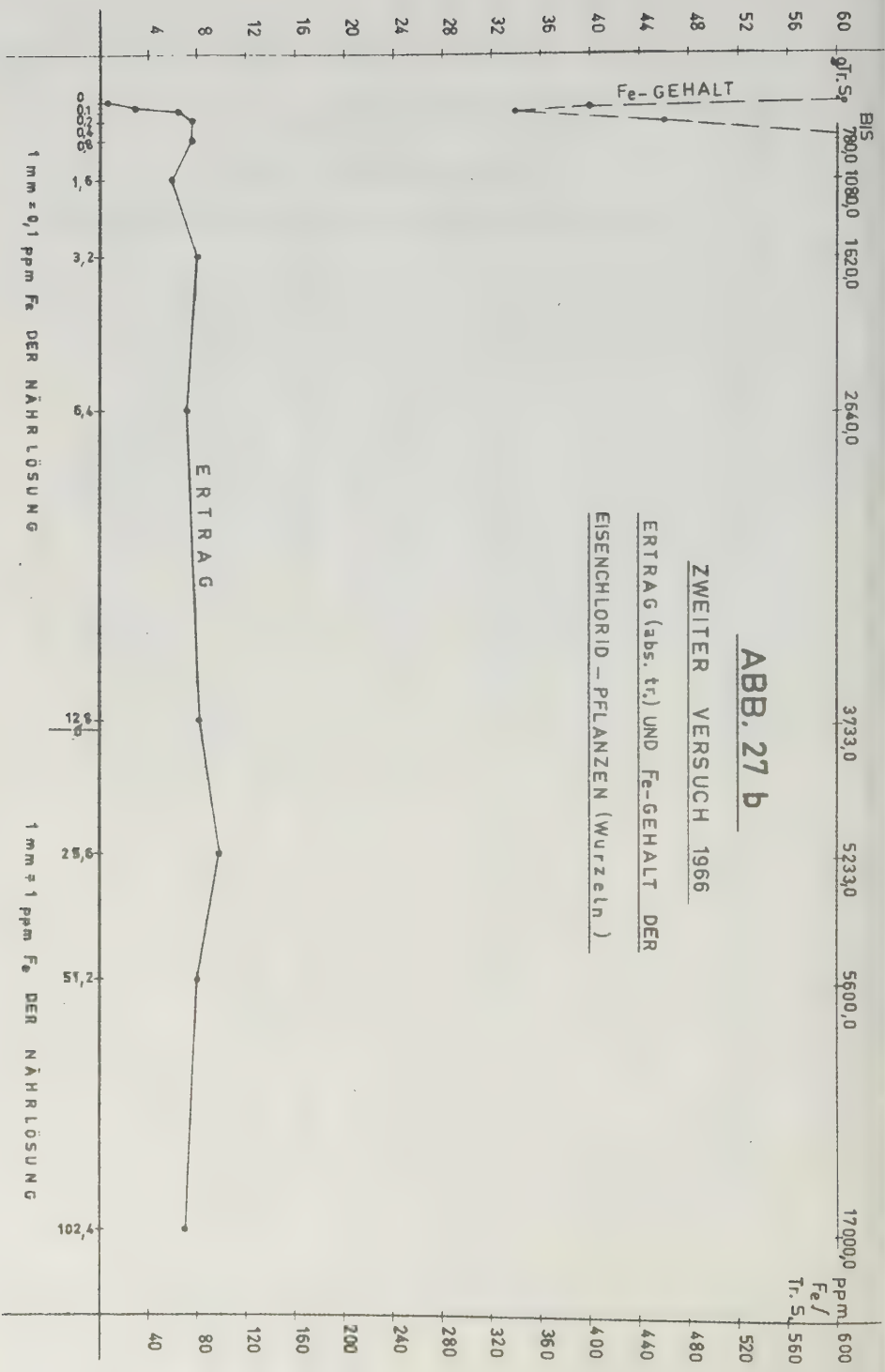


ABB. 27 b

ZWEITER VERSUCH 1966

ERTRAG (abs. tr.) UND Fe-GEHALT DER
EISENCHLORID - PFLANZEN (Wurzeln)



Zweiter Versuch (1966)

Ertrag (frisch und abs. trocken), Eisengehalte und Eisenentzüge der Disenchlorid-Maispflanzen.

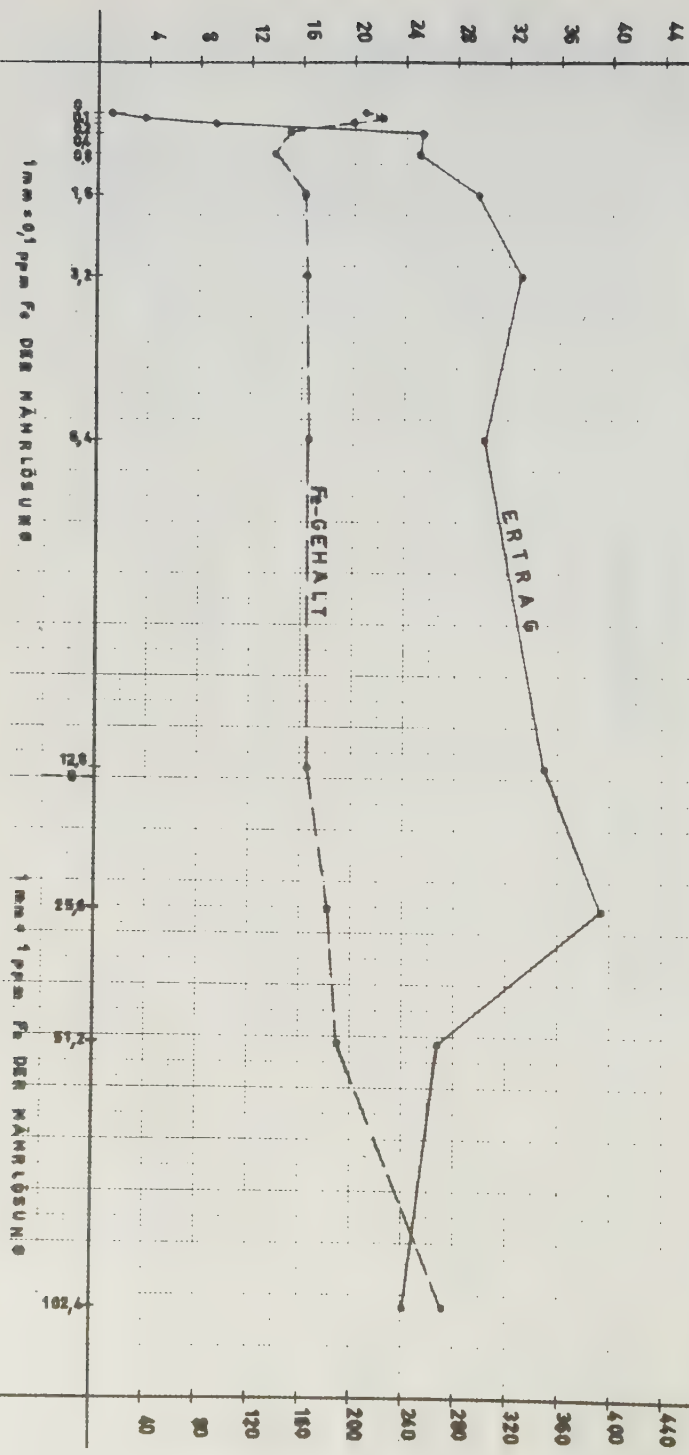
ppm Fe der Nähr- lö- sung	Ertrag/Gefäß g Frischsub.		Ertrag/Gefäß g abs. Tr.-Sub.				Fe/g Trockensub.		mg Fe/ Trockensub. je Gefäß	
	Ober- Teile	Mit- tel	Ober- Teile	Mit- tel	Wur- zeln	Mit- tel	Ober- Teile	Wur- zeln	Ober- Teile	Wur- zeln
0	2,0 2,8 2,3 3,1	2,6	1,3 2,0 1,3 1,5	1,5	0,7 0,8 0,7 0,8	0,75	318,0	606,0	0,477	0,455
0,1	85,0 116,5 112,0 125,5	110,0	7,6 6,4 7,8 6,8	7,2	3,2 1,5 3,1 4,0	3,0	242,0	400,0	1,742	1,200
0,2	341,0 296,5 329,5 340,5	327,0	23,3 21,8 22,0 25,7	23,2	6,7 6,5 6,8 6,0	6,5	170,0	340,0	3,944	2,210
0,4	343,5 440,0 494,0 425,5	426,0	26,8 22,6 39,7 35,0	33,5	7,3 7,0 8,0 8,0	7,7	146,0	460,0	4,891	3,542
0,8	496,5 452,0 470,0 477,0	474,0	39,2 32,8 40,3 39,2	37,9	7,3 6,3 9,5 7,1	7,6	148,0	780,0	5,609	5,928
1,6	378,0 343,0 351,5 387,0	365,0	28,8 28,7 25,2 29,0	27,9	6,1 7,0 5,0 5,8	6,0	158,0	1080,0	4,408	6,480
3,2	415,5 423,0 457,0 410,0	426,5	35,8 41,0 35,0 35,5	36,8	8,8 8,6 7,0 7,8	8,1	162,0	1620,0	5,962	13,122
6,4	465,0 484,0 465,0 454,0	467,0	38,5 34,0 35,8 35,9	36,1	8,0 7,3 6,8 7,0	7,3	188,0	2640,0	6,787	19,272
12,8	414,0 451,0 455,0 460,0	445,0	32,0 36,8 37,3 36,5	35,7	7,8 8,8 7,3 9,3	8,3	182,0	3733,0	6,497	30,984
25,6	505,0 514,0 505,0 500,0	506,0	45,0 41,8 41,2 45,0	43,3	10,8 9,2 9,6 9,8	9,9	184,0	5233,0	7,967	51,807
51,2	519,0 456,5 505,0 435,0	491,5	41,2 37,0 37,3 42,0	39,5	7,2 7,8 10,1 7,1	8,1	212,0	5600,0	8,374	45,360
102,4	377,0 340,0 407,0 368,0	373,0	30,0 32,0 37,5 33,5	33,3	6,8 7,0 7,0 7,5	7,1	244,0	17000,0	8,125	120,700

60 + 91.5

PPM 600
Fe /
Tr. S. 560

520

1480



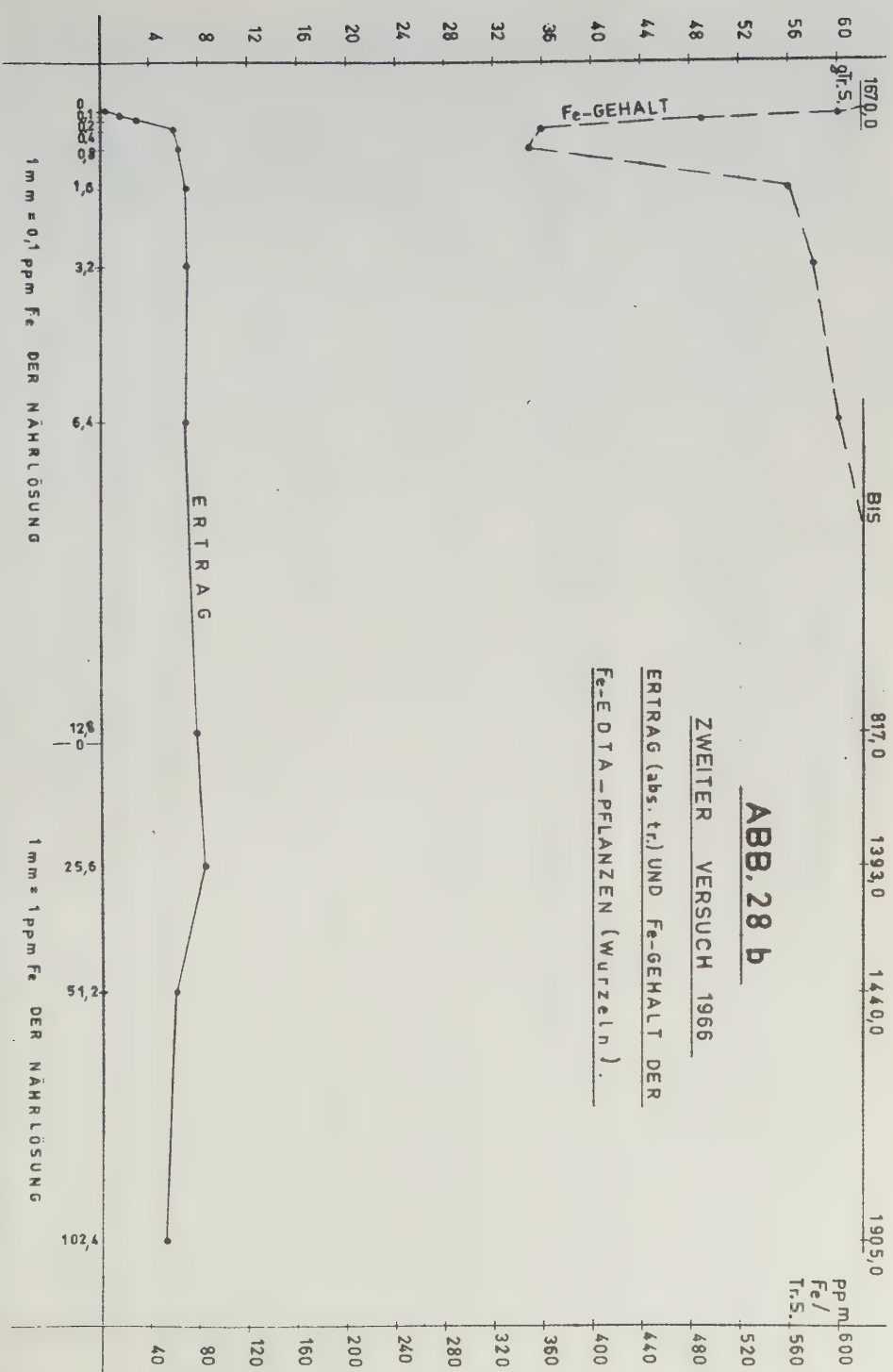


ABB. 28 b

ZWEITER VERSUCH 1966

ERTRAG (abs. tr.) UND Fe-GEHALT DER

Fe-EDTA-PFLANZEN (WURZELN).

BIS 1670,0 817,0 1393,0 1440,0 1905,0

ppm Fe/
t.S.

Zweiter Versuch (1966)

Ertrag (frisch und abs. trocken), Eisengehalte und Eisenentzüge der Fe-EDTA-Maispflanzen.

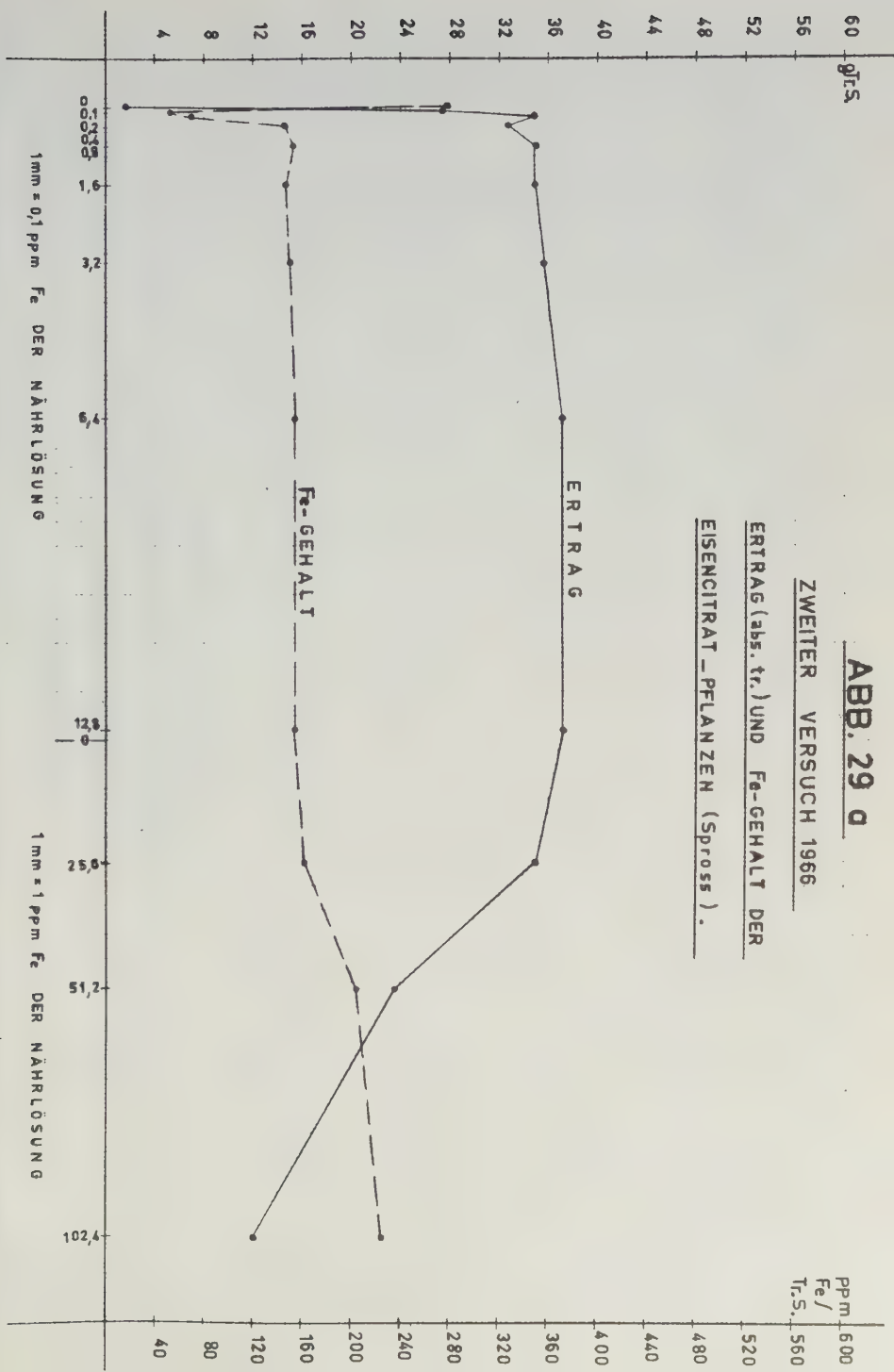
ppm Fe der Nähr- lös- ung	Ertrag/Gefäß g Frischsub.		Ertrag/Gefäß g abs. Tr.-Sub.				Fe/g Trockensub.		mg Fe/ Trockensub. je Gefäß	
	Ober. Teile	Mit- tel	Ober. Teile	Mit- tel	Wur- zeln	Mit- tel	Ober. Teile	Wur- zeln	Ober. Teile	Wur- zeln
0	1,8 2,2 1,9 2,2	2,0	1,1 1,2 1,0 1,2	1,1	0,4 0,7 0,3 0,3	0,42	208,0	1760,0	0,229	0,739
0,1	63,2 35,1 58,8 30,0	46,8	5,0 2,4 4,5 3,0	3,7	1,9 1,2 1,6 1,8	1,6	222,0	600,0	0,821	0,960
0,2	149,0 151,0 140,0 71,5	128,0	9,3 11,2 10,8 5,5	9,2	2,9 3,8 3,1 2,1	3,0	198,0	490,0	1,822	1,470
0,4	315,0 328,0 314,5 325,0	321,0	26,9 23,0 26,0 25,2	25,3	6,3 5,5 6,0 6,1	6,0	150,0	360,0	3,795	2,160
0,8	322,0 356,5 336,5 344,0	340,0	25,5 26,0 25,5 23,0	25,0	6,3 6,2 6,3 6,8	6,4	138,0	350,0	3,450	2,240
1,6	378,5 357,0 376,5 374,0	371,5	30,3 29,8 29,3 28,8	29,6	6,7 7,0 6,8 7,0	6,9	162,0	560,0	4,795	3,864
3,2	394,0 373,0 381,5 375,0	381,0	39,3 28,0 32,3 32,5	33,0	6,8 7,0 6,8 7,5	7,0	164,0	580,0	5,412	4,060
6,4	409,0 383,5 375,0 392,5	390,0	30,3 29,5 30,8 30,3	30,2	6,9 7,3 7,0 6,8	7,0	166,0	600,0	5,013	4,200
12,8	422,0 408,0 424,5 396,0	413,0	35,8 34,3 36,8 32,5	34,9	7,8 8,0 8,1 7,2	7,8	166,0	817,0	5,793	6,373
25,6	459,5 505,0 451,5 413,0	457,5	38,5 40,5 39,0 39,5	39,4	8,3 8,4 8,8 8,5	8,5	182,0	1393,0	7,171	11,841
51,2	336,0 362,5 335,0 384,0	354,5	26,8 28,0 29,0 23,3	26,8	5,1 5,6 7,5 6,0	6,1	190,0	1440,0	5,092	8,784
102,4	268,0 283,0 302,0 248,0	275,5	21,2 26,8 26,0 22,4	24,1	4,5 6,2 5,7 4,7	5,3	272,0	1905,0	6,555	10,097

ABB. 29 a

ZWEITER VERSUCH 1966

ERTRAG (abs. tr.) UND Fe-GEHALT DER

EISENCITRAT-PFLANZEN (Spross) .

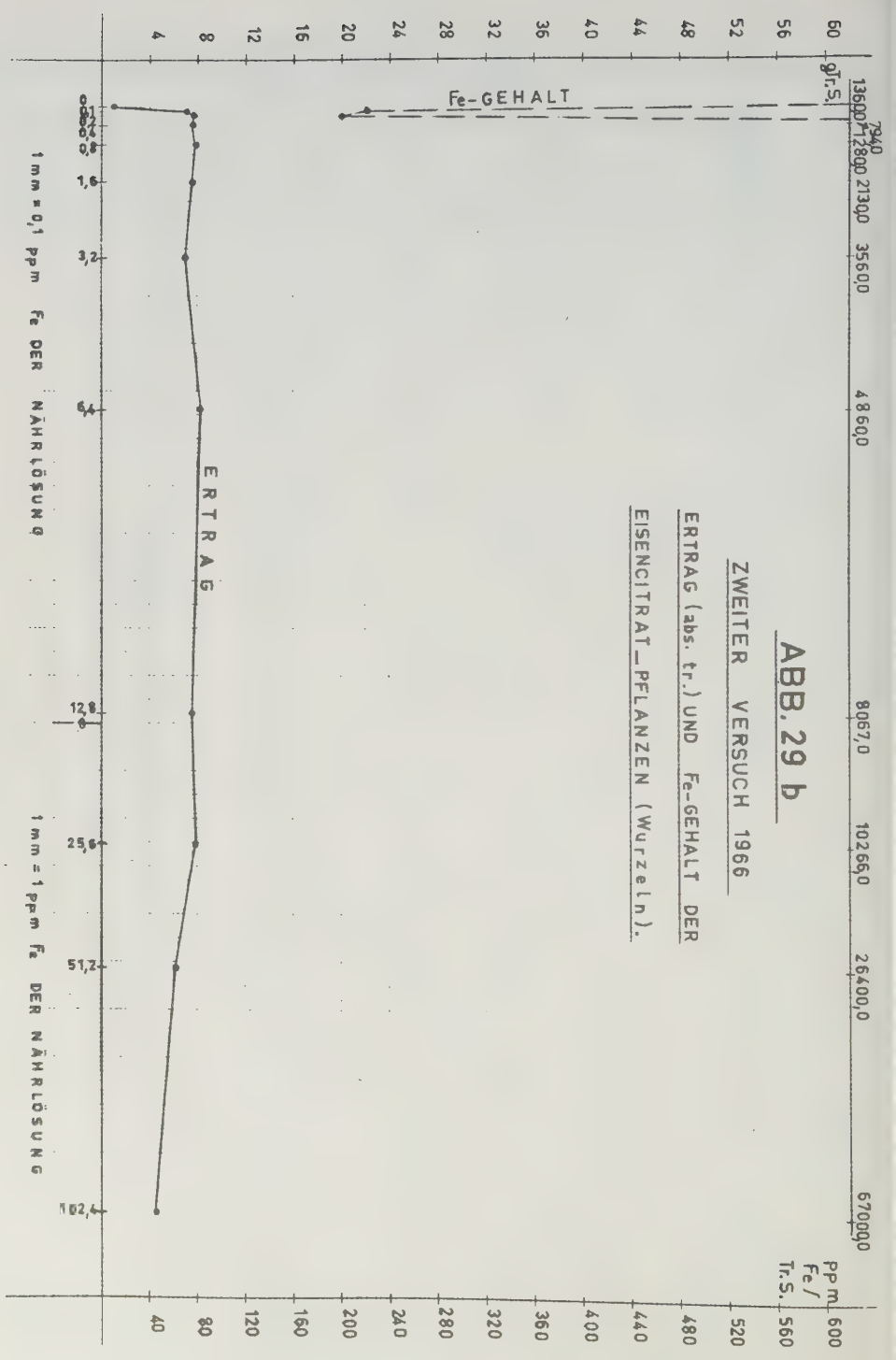


ppm
Fe/
Tr.S.

ABB. 29 b

ZWEITER VERSUCH 1966

ERTRAG (abs. tr.) UND Fe-GEHALT DER
EISENCITRAT-PFLANZEN (Wurzeln).



Tab. 35

Zweiter Versuch (1966)

Ertrag (frisch und abs. trocken), Eisengehalte und Eisenentzüge
der Eisencitrat-Maispflanzen.

ppm Fe der Mähr- lö- sung	Ertrag/Gefäß g Frischsub.		Ertrag/Gefäß g abs. Tr.-Sub.				Fe/g Trockensub.		mg Fe/ Trockensub. je Gefäß	
	Ober. Teile	Mit- tel	Ober. Teile	Mit- tel	Wur- zeln	Mit- tel	Ober. Teile	Wur- zeln	Ober. Teile	Wur- zeln
0	5,5 2,0 2,2 7,5	4,3	2,0 1,2 1,2 2,0	1,6	1,0 0,7 0,8 1,2	0,9	278,0	1360,0	0,445	1,224
0,1	347,0 357,0 348,0 335,0	347,0	29,5 28,2 26,2 25,5	27,4	7,3 7,1 8,0 6,0	7,1	52,5	220,0	1,439	1,562
0,2	485,0 367,0 391,5 460,0	426,0	40,8 33,0 30,0 35,3	34,8	8,3 6,9 6,1 9,0	7,6	69,0	200,0	2,401	1,520
0,4	414,0 366,0 440,5 310,0	383,0	36,8 31,2 38,2 25,3	32,9	9,3 8,0 6,1 7,0	7,6	146,0	794,0	4,803	6,034
0,8	431,0 456,5 409,0 440,0	434,5	35,0 37,2 33,3 34,0	34,9	7,8 7,3 8,8 7,3	7,8	153,0	1280,0	5,340	9,984
1,6	357,0 465,0 437,0 400,0	415,0	28,6 40,0 36,2 34,8	34,9	6,1 9,5 7,8 6,8	7,6	146,0	2130,0	5,095	16,188
3,2	399,0 396,0 409,0 419,0	405,5	38,2 31,3 36,2 36,5	35,6	8,1 6,5 6,4 7,0	7,0	150,0	3560,0	5,340	24,920
6,4	434,0 413,0 417,2 420,0	421,0	39,2 35,0 38,0 36,3	37,1	10,0 8,0 7,5 7,8	8,3	154,0	4860,0	5,713	40,338
12,8	417,0 400,0 417,0 375,0	402,5	38,0 35,0 38,9 37,0	37,2	7,5 8,4 7,2 7,2	7,6	154,0	8067,0	5,729	61,309
25,6	397,0 368,0 364,0 409,0	384,5	37,2 33,5 33,3 35,8	35,0	8,0 6,2 10,3 7,3	7,9	162,0	10266,0	5,670	81,101
51,2	316,5 320,0 275,5 189,0	275,5	26,2 26,0 25,2 17,0	23,6	6,0 7,2 7,0 4,5	6,2	204,0	26400,0	4,814	163,680
102,4	115,0 155,0 162,0 110,0	135,5	9,5 14,0 15,5 9,5	12,1	3,0 6,0 5,8 3,5	4,6	226,0	67000,0	2,735	308,200

III Diskussion der Wasserkultur-Versuche.

In diesen Versuchen sollten die Zusammenhänge zwischen dem Eisen als unentbehrlichem Nährstoff und dem Wachstum, bzw. dem Ertrag und dem Eisengehalt der Maispflanzen, behandelt werden. Die aus reinem Sand entnommenen 18-20 cm hohen Maiskeimlinge wuchsen während aller Versuche in einer Vegetationshalle in Wasserkulturgefäßen mit der gleichen Nährlösung (S. 87). Die erste Wirkung des Eisens auf das Maiswachstum wurde wenige Tage nach der Eisenzufuhr in den drei genannten Eisenformen (S. 88) sichtbar. Das schnelle Vergilben der ohne Fe ernährten Pflanzen zeigte erneut die Bedeutung dieses Elementes für das Pflanzenwachstum. Die nach kurzer Zeit sichtbaren Eisenmangelerscheinungen bei diesen Pflanzen führten innerhalb von zwei Wochen zu völlig weißlichen und dann vertrocknenden Pflanzen.

Die Eisenbestimmungen in der Nährlösung bei deren Wechsel ließen erkennen (Tab. 18, 23, 28 und 32), daß die jüngeren Maispflanzen größere Eisenmengen aufnahmen als die älteren. Dies gibt einen Hinweis für den erhöhten Eisenbedarf der Pflanzen in der Jugendentwicklung. Trotzdem können Eisenmangelpflanzen durch eine spätere Eisenzufuhr geheilt werden. Ob jedoch die von der Eisenchlorose geheilten Pflanzen noch in der Lage sind, das Höchstertragsgebiet zu erreichen, hängt von der Intensität der Eisenchlorose, von den zugeführten Eisenmengen, bzw. der Eisenform und dem Pflanzenentwicklungsstadium ab.

Bei niedrigen, bei den einzelnen Eisenformen verschiedenen Fe-Konzentrationen der Nährlösung traten Eisenmangelsymptome bzw. Ertragsdepressionen auf. Weitere Eisenzufuhr durch Nährlösungswechsel mit derselben Fe-Konzentration, hilft den Pflanzen nicht, sich von der Eisenchlorose zu befreien. Dies weist auf die Notwendigkeit einer bestimmten Fe-Konzentration der Nährlösung zur Vermeidung des Entstehens der Eisenchlorose hin und gleichzeitig zur Erzeugung eines optimalen Ertrages. Weiterhin ergaben sich bestimmte Bereiche, in denen die Konzentration des Eisens (in seinen drei Formen) liegen muß, wenn der Optimalertrag erreicht werden soll.

1. Die Veränderung des pH-Wertes der Wasserkultur während des Maiswachstums.

Bemerkenswert war der Einfluß größerer Mengen von Eisen in Eisenchloridform auf den pH-Wert der Nährlösung. Aber auch in Versuchsreihen mit hohem Ertrag, bei einem relativ geringen Eisengehalt der Nährlösung, gleichgültig in welcher Form, wurde eine deutliche Erniedrigung des pH-Wertes der Nährlösung festgestellt (Tab. 22 und 27). Diese Veränderung des pH-Wertes der Nährlösung wird durch die unterschiedliche Aufnahme von Anionen und Kationen verursacht. Die Form des zugeführten Eisens spielt dabei eine Rolle. Sowohl steigende Konzentrationen des Eisens in Chlorid-Form als auch die bevorzugte Aufnahme bestimmter Ionen durch die Pflanzen führen also zu einer Erniedrigung des pH-Wertes der Nährlösung. Diese Erniedrigung weist darüber hinaus auf eine Beziehung zwischen Eisenaufnahme und der Aufnahme anderer Ionen hin. Unter Mangel-bis optimalen Eisenverhältnissen der Nährlösung findet eine größere Kationenabsorption durch die Maiswurzeln statt. Diese ungewöhnliche Erniedrigung des pH-Wertes der Nährlösung kann nicht als selbstverständliche Erscheinung betrachtet werden. Die Zusammensetzung der in den vorliegenden Wasserkulturversuchen benutzten Nährlösung kann dabei eine Rolle gespielt haben. Bekanntlich beeinflußt die Form des N in der Nährlösung den Eisenzustand und die Eisenaufnahme. Zwar enthielt die Nährlösung mehr NO_3^- als NH_4^- -Stickstoff, doch vermutlich bevorzugten die Maispflanzen in ihrer N-Aufnahme die Ammoniumionen.

Andererseits hat sich der pH-Wert der Nährlösung, die höhere Eisenkonzentrationen in Chelat-und Citratform enthielt, nicht verändert. In diesem Fall absorbierten die Maiswurzeln größere Eisenmengen, wodurch die Absorption anderer Ionen (mit ihrem Einfluß auf den pH-Wert der Nährlösung) möglicherweise blockiert wurde.

2. Der unterschiedliche Bedarf der Pflanzen an den verschiedenen Eisenformen.

Die beobachtete Eisenmangelchlorose an den mit niedrigen Eisenkonzentrationen in Eisenchelate-Form ernährten Maispflanzen weist

auf die geringe Wirkung dieser Fe-EDTA-Konzentrationen zum Erzielen eines gesunden Wachstums hin. Im Gegensatz dazu brachten die Maispflanzen im zweiten Versuch der ersten Vegetation ihre höchsten Erträge in der Fe-Chlorid- (Tab. 19), bei den Eisenstufen 0,3 und 0,6 ppm Fe und in der Fe-Citrat-Reihe (Tab. 21) bei der Eisenstufe 0,6 ppm Fe. Bei diesen Eisenkonzentrationen in der Fe-Chelat-Reihe zeigten die Maispflanzen Eisenmangelchlorose. Die Ergebnisse der anderen Versuche stimmten mit diesem Ergebnis überein. Auch im zweiten Versuch der zweiten Vegetation, wo die Pflanzen in neutraler Nährlösung wuchsen, zeigten sie ebenfalls bei der niedrigen Fe-EDTA-Konzentration Eisenmangelsymptome. Die bessere Wirkung des Eisens in Chlorid- und Citrat-Form hinsichtlich der Chloroseerscheinungen im Vergleich zum Fe-EDTA geht parallel mit ihrer Fähigkeit, die höchsten Erträge zu erzeugen. Ähnliche Ergebnisse brachten die Untersuchungen von DRIEL (1964) bei Tomatenpflanzen. Der Autor fand, daß Fe-EDTA weniger wirksam als FeSO_4 war.

Die eigenen Untersuchungen führen zu dem Ergebnis, daß zum Erzielen des Höchstertrages der Maispflanzen unter den vorliegenden Bedingungen der Wasserkultur die Eisenkonzentration der Nährlösung 0,8-0,9 ppm Fe als Eisenchlorid, 6,5-10,0 ppm Fe als Eisen-EDTA und 0,3-1,6 ppm Fe als Eisencitrat betragen soll.

Die schon erwähnte und durch diese Untersuchungen bestätigte Fähigkeit der Maiswurzeln, größere Eisenmengen in Chlorid- und Citrat-Form als in Chelat-Form zu absorbieren, weist auf die geringe Menge an dissoziiertem Eisen in der Nährlösung bei der Verwendung von Fe-EDTA hin. Ursache hierfür ist die hohe Stabilitätskonstante (10^{25}). Auch bei Neutralisation der durch Pflanzenentzug entstandenen Nährlösungsazidität (wie im zweiten Versuch der zweiten Vegetationsperiode), bestand weiterhin die Fähigkeit der Maiswurzeln, größere Eisenmengen in Chlorid- und Citrat-Form als in Chelat-Form zu absorbieren. Die Neutralisation des abgesunkenen pH-Wertes der Nährlösung führte zu heftiger Ausfällung des Eisens in den Versuchsreihen mit hoher Eisenchlorid-Gabe (Tab. 32). Das nach der Ausfällung in Lösung verbleibende Eisen reichte bei niedrigen Konzentrationen für ein gesundes Wachstum nicht aus. Als Beweis dafür gilt der be-

obachtete Ertragsabfall bei der Eisenstufe 1,6 ppm Fe als Fe-Chlorid (Abb. 24; Tab. 33). In diesem Fall verursachte die saure Reaktion dieses Salzes in dieser Konzentration eine pH-Erniedrigung. Neben der entstandenen Azidität durch bevorzugte Kationenaufnahme aus der Nährlösung erforderte das eine relativ große NaOH-Menge zur Neutralisation dieser gesamten Azidität. Dadurch fiel das Eisen aus und die Pflanzen wurden nicht ausreichend mit Fe versorgt. Der steigende Ertrag der Maispflanzen bei steigenden Eisenmengen in Chloridform weist darauf hin, daß bei neutraler Reaktion nicht das gesamte Eisen ausfällt, sondern ein Bruchteil des Eisenchlorids verfügbar und aufnehmbar durch die Pflanzen bleibt.

Auch bei Verwendung von Eisen-EDTA und Eisencitrat verzögert die Neutralisation der Azidität der Nährlösung die Ausbildung des Höchstertrages (Tab. 34 und 35).

Im allgemeinen brauchten die Maispflanzen in normal behandelter Wasserkultur mehr Eisen in Chelatform als in Chlorid- und Citratform, um den höchsten Ertrag zu erzeugen. Ähnliche Ergebnisse brachten die Untersuchungen von OERTLI und JACOBSON (1960). Die Autoren sind der Meinung, daß die meisten Pflanzen mit 1/10 der zugeführten Fe-EDTA-Menge in FeSO_4 -Form für ein gesundes Wachstum auskommen können.

3. Die unterschiedliche Wirkung der verschiedenen Eisenformen.

Der unterschiedliche Bedarf der Pflanzen an Eisen in seinen verschiedenen Formen, erklärt teilweise die unterschiedliche Wirkung gleicher Eisenkonzentrationen aber in unterschiedlicher Form. Weiterhin konnten bei der Steigerung der drei Eisenformen ihre drei Wirkungsbereiche (Mangel, ausreichend und toxisch) auf das Maiswachstum beobachtet werden.

Die eigenen Untersuchungen stellten eine Ertragssteigerung durch steigende Eisenkonzentrationen bis zu den vorgeschlagenen Eisenkonzentrationen der Nährlösung fest. Hierbei ist mit dem Ertrag das frische und trockene Gewicht der Maispflanzen gemeint. Die Anwendung von Eisenchlorid und Eisencitrat verursachte in allen Versuchen eine rasche Steigerung der Frisch- und Trockengewichte (Oberirdische Teile und Wurzeln). Die ge-

ringe Wirkung niedriger Fe-EDTA-Konzentrationen wurden bereits erwähnt.

4. Die Eisenernährung und der Maisertrag.

Die eigenen Wasserkulturversuche, in denen die Eisengabe variiert wurde, ergaben die höchsten Erträge bei ganz bestimmter Konzentration der drei Eisenformen in der Nährlösung (Tab. 36). Die Ergebnisse des zweiten Versuches in der ersten Vegetationsperiode zeigten eine unterschiedliche Wirkung jeder Eisenform zum Erzielen des Höchstertrages (Oberirdische Teile). Eisen-EDTA brachte einen größeren Ertrag (Trockengewicht), als die beiden anderen Eisenformen. Der höchste durch Eisencitrat erzielte Frischertrag reichte an den des Eisenchelats heran. Die Maispflanzen der Eisenchloridbehandlung zeichneten sich jedoch durch einen hohen Wassergehalt aus. Der höchste Ertrag der Eisencitratbehandlung (Frisch- und Trockengewicht) war niedriger als bei den beiden anderen Eisenformen.

Im dritten Versuch der gleichen Vegetation mit längerer Wachstumsperiode ergaben sich die höchsten Erträge (Frischgewicht) in der Reihenfolge Eisenchlorid, Eisenchelat und Eisencitrat. Das Trockengewicht der Eisenchelatpflanzen war höher als bei den anderen beiden Eisenformen. Es kann vermutet werden, daß diese Zunahme im Trockengewicht der EDTA-Pflanzen auf den N-Gehalt dieser Verbindung und einen dadurch erhöhten Proteingehalt zurückgeführt werden kann. Darüber hinaus weist diese Erscheinung auf eine mögliche Aufnahme der Chelatkomponenten (EDTA) der zugeführten Eisenchelatverbindung hin. Diese Zunahme im Trockengewicht der mit Fe-EDTA behandelten Maispflanzen konnte im ersten Versuch der zweiten Vegetation (1966) nicht bestätigt werden. Manche Autoren behaupten eine Zunahme des Trockengewichtes der Pflanzen bei Anwendung von Eisenchelatverbindungen. Andere Autoren verneinen sie.

Tab. 36

Zusammenhänge zwischen Höchsterträgen und Eisengehalten
der Maispflanzen.

		Vegetation I (1965)		Vegetation II (1966)	
		2.Versuch	3.Versuch	1.Versuch	2.Versuch
Fe - CHLORID	ppm Fe d. Nährlösg.	0,3;0,6	0,9	0,8	25,6
	OBERD. TEILE	Frischsub. (g)	233,0;237,0	690,0	383,0
		Trockensub. (g)	22,2;21,7	49,9	30,4
		Trockensub. Frischsub. %	9,5;9,0	7,2	7,9
		γ Fe/g Tr.-Sub.	55,2;101,0	52,8	90,0
		γ Fe/g Tr.-Sub.	151,2;247,2	215,2	620,0
	WURZELN	Frischsub. (g)	294,0;292,5	574,0	378,0
		Trockensub. (g)	29,3;29,8	63,4	29,3
		Trockensub. Frischsub. %	9,9;10,1	11,0	7,7
		γ Fe/g Tr.-Sub.	55,0;69,6	74,4	78,0
		γ Fe/g Tr.-Sub.	302,4;518,4	202,0	316,0
Fe - EDTA	ppm Fe d. Nährlösg.	4,8;9,6	8,1	6,4	25,6
	OBERD. TEILE	Frischsub. (g)	290,0;271,5	410,0;382,0	357,0
		Trockensub. (g)	26,9;26,1	46,6;46,9	29,2
		Trockensub. Frischsub. %	9,3;9,6	11,4;12,2	8,1
		γ Fe/g Tr.-Sub.	45,6;50,4	43,2;105,6	102,0
		γ Fe/g Tr.-Sub.	247,2;511,2	274,8;856,0	738,0
	WURZELN	Frischsub. (g)	290,0;271,5	410,0;382,0	357,0
		Trockensub. (g)	26,9;26,1	46,6;46,9	29,2
		Trockensub. Frischsub. %	9,3;9,6	11,4;12,2	8,1
		γ Fe/g Tr.-Sub.	45,6;50,4	43,2;105,6	102,0
		γ Fe/g Tr.-Sub.	247,2;511,2	274,8;856,0	738,0
Fe - CITRAT	ppm Fe d. Nährlösg.	0,6;1,2	0,3;0,9	1,6	6,4
	OBERD. TEILE	Frischsub. (g)	290,0;271,5	410,0;382,0	357,0
		Trockensub. (g)	26,9;26,1	46,6;46,9	29,2
		Trockensub. Frischsub. %	9,3;9,6	11,4;12,2	8,1
		γ Fe/g Tr.-Sub.	45,6;50,4	43,2;105,6	102,0
		γ Fe/g Tr.-Sub.	247,2;511,2	274,8;856,0	738,0
	WURZELN	Frischsub. (g)	290,0;271,5	410,0;382,0	357,0
		Trockensub. (g)	26,9;26,1	46,6;46,9	29,2
		Trockensub. Frischsub. %	9,3;9,6	11,4;12,2	8,1
		γ Fe/g Tr.-Sub.	45,6;50,4	43,2;105,6	102,0
		γ Fe/g Tr.-Sub.	247,2;511,2	274,8;856,0	738,0

5. Die Wirkung der neutralen Nährlösungsreaktion auf das Maiswachstum.

Die neutrale Reaktion der Nährlösung äußerte sich in einer allgemeinen Erhöhung des Trockengewichtes der Maispflanzen in allen Steigerungsstufen bei allen drei Eisenformen (Tab. 33, 34 und 35). Ähnliche Ergebnisse fanden EDWIN und Mitarbeiter (1960) in ihren Versuchen an Sorghum-Pflanzen, die in neutralen und alkalischen Wasserkulturen wuchsen. Die Autoren betrachten diese Erscheinung als unerklärlich.

Die im eigenen Versuch bei neutraler Nährlösung gewachsenen Maispflanzen ergaben den höchsten Ertrag, wegen der Ausfällung des Eisens im neutralen Bereich, bei 25,6 ppm Fe als Fe-Chlorid und nicht wie im ersten Versuch derselben Vegetationsperiode bei 0,8 ppm Fe.

Bei der gleichen Eisenkonzentration von 25,6 ppm Fe hatte auch die Eisenchelatreihe ihren höchsten Ertrag, während bei Eisencitrat bereits bei 6,4 ppm Fe der Höchstertrag erreicht wurde. Es wurde somit die günstige Eisenwirkung von Fe-Citrat bei neutraler Reaktion erneut bestätigt.

Das Verhältnis Trockengewicht/Frischgewicht war nicht konstant. Bei Pflanzen, die Ertragsdepressionen durch zu hohe Eisengaben erlitten, war das Verhältnis größer als bei gesunden Pflanzen.

Es ist noch in Zusammenhang mit dem Eiseneinfluß auf den Maisertrag zu erwähnen, daß die Erträge der Maiswurzeln der verschiedenen Behandlungen aller Wasserkulturversuche den Erträgen der oberirdischen Teile in ihren Wachstumsverhältnissen ähnelten. Die Ertragsbildung bei den Wurzeln verlief ähnlich wie bei den Sprossen.

6. Die toxische Wirkung des Eisens.

Sowohl eine nicht genügende Eisenzufuhr als auch die Anwendung überschüssiger Mengen dieses Elementes in verschiedenen Formen beeinträchtigen den Pflanzenertrag. Die Ertragsdepression, die bei Zufuhr größerer Mengen der verschiedenen Eisenformen entsteht, kann auf die toxische Wirkung des überschüssigen Eisens

zurückgeführt werden. Im dritten Versuch der ersten Vegetationsperiode verursachten die höheren Konzentrationen des Eisens in Eisenchlorid- und Eisencitrat-Form stärkere Ertragsdepressionen als bei Anwendung in Eisenchelat-Form. Bei der Eisenstufe 24,3 ppm Fe war das Maiswachstum bei Eisencitratbehandlung (Abb. 17) viel kräftiger als bei der entsprechenden Eisenchloridstufe (Abb. 15). Dies weist darauf hin, daß hohe Konzentrationen Eisen in Chloridform toxischer wirken als in Citratform. Die Ergebnisse des ersten Versuches in der zweiten Vegetationsperiode stimmten hiernit überein. Infolge dessen können die drei Eisenformen in Hinblick auf ihre Toxizität in der Reihenfolge Eisenchlorid > Eisencitrat > Eisenchelat geordnet werden. Die stärkere Wirkung des Eisens in Chloridform kann neben einer spezifischen Wirkung des Eisenions auch auf die Reaktionsverschiebung in den neutralisierten Wasserkulturen zurückgeführt werden. Die wichtige physiologische Funktion der Citrate in den Pflanzen (z.B. der Eisentransport) erklärt teilweise die geringere Toxizität und die größere Wirksamkeit des Eisens dieser Verbindung im Vergleich zur Eisenchloridform. Die starke Eisenabsorption an den Maiswurzeln bei Zufuhr größerer Mengen Eisencitrat führt hauptsächlich zur toxischen Wirkung. Die sehr schwache Dissoziation der Eisenchelatverbindung (Fe-EDTA) auf Grund ihrer hohen Stabilitätskonstanten vermindert die toxische Wirkung hoher Konzentrationen dieser Eisenform auf das Pflanzenwachstum. Gemeinsam für alle drei Eisenformen äußerte sich ihre toxische Wirkung vor allem im Ersatz der grünen Farbe des Chlorophylls durch die roten Pigmente (wie Anthotyan). Bei hohem Eisenangebot nehmen die Pflanzen größere Eisenmengen auf. In diesem Fall wird der überwiegende Teil des Eisens in der Pflanze inaktiviert; die Aufnahme bzw. die Funktion anderer Nährstoffe wird gehemmt, was im Extremfall zum Vertrocknen der Pflanzen führt.

7. Eisenangebot und Eisengehalt der Maispflanzen.

Bei allen Versuchen war bemerkenswert, daß im Ertrag stark geschädigten Pflanzen der Kontrollreihe einen höheren Eisengehalt aufwiesen als die Pflanzen im optimalen Ertragsbereich. Mei-

stens war es sogar so, daß in den Versuchsreihen des höchsten Ertrages gleichzeitig der niedrigste Eisengehalt anzutreffen war. Jedoch war der Eisenentzug durch die Eisenmangelpflanzen in den Kontrollreihen niedriger als in den Reihen mit normaler Ertragsbildung. Ein bestimmter Einfluß der Form des zugeführten Eisens auf den Eisengehalt der Pflanzen konnte in diesen Untersuchungen nicht festgestellt werden. Die Meinung von DRIEL (1964), daß die mit Eisenchelat behandelten Pflanzen einen höheren Fe-Gehalt besitzen als die mit anderen Eisenformen ernährten Pflanzen, wurde durch die eigenen Ergebnisse nicht bestätigt. Es bestanden bei allen Versuchen keine Zusammenhänge zwischen dem Eisengehalt der Pflanzen im Höchstertragsgebiet und der Eisenform.

Bei Neutralisation der Nährlösung ergaben sich nicht nur hohe Erträge sondern auch die Eisengehalte der Maispflanzen waren ganz allgemein höher, also auch im Höchstertragsgebiet, im Vergleich zu den übrigen Versuchen (Tab. 36).

EDWIN und Mitarbeiter (1960) erhielten ähnliche Ergebnisse bei in neutralisierter Wasserkultur gewachsenen Sorghum-Pflanzen. Der Eisengehalt solcher Pflanzen lag viel höher als der in saurer Wasserkultur. Die Autoren vermuten, daß die Alkalität der Nährlösung einen Einfluß auf den Eisentransport in der Pflanze ausübt. Andere Autoren sind der Meinung, daß in neutraler Reaktion Ionen (wie FeOH^{++} und $\text{Fe}(\text{OH})_2^+$) gebildet werden, die von der Pflanze leichter aufgenommen werden können.

Weiterhin ergaben die eigenen Untersuchungen, daß bei hohem Eisensangebot der Eisengehalt erhöht wird, was mit Ertragsdepressionen verbunden ist. Die Ertragsdepressionen waren bei den einzelnen Eisenformen verschieden stark ausgeprägt. Die starke Eisenaufnahme aus hohen Konzentrationen von Eisen-Chlorid und -Citrat verursachte stärkere und frühere Ertragsdepressionen als bei der Anwendung größerer Eisenchelatmengen. Aber auch schon vor der Entstehung einer Ertragsdepression stieg im Höchstertragsgebiet der Eisengehalt, bzw. der Eisenentzug der Maispflanzen an. Danach erhöhte sich nur noch der Eisengehalt, während der Eisenentzug wegen der starken Ertragsdepression absank. Die Neutralisation der Nährlösung setzte die starke Eisenaufnahme

me, bzw. den hohen Eisengehalt der Nährlösung bei hohen Eisenchlorid-bzw. Eisencitrat-Konzentrationen deutlich herab (Tab. 33 und 35), womit die Verringerung der Ertragsdepression erklärt werden kann.

Bei den Wurzeln ergab sich die gleiche Erscheinung wie bei den oberirdischen Teilen, daß nämlich die Wurzeln der Kontrollreihen einen höheren Eisengehalt aufwiesen als die Wurzeln bei optimaler Ertragsbildung. Über das Höchstertragsgebiet hinaus stieg dann mit steigendem Eisenangebot der Eisengehalt und meistens der Eisenentzug der Wurzeln wieder an. Die Eisengehalte bei den höchsten Wurzelserträgen (welche den höchsten Erträgen an oberirdischen Teilen entsprechen) (Tab. 36) zeigen, speziell im dritten Versuch des Jahres 1965 und im ersten Versuch des Jahres 1966, daß die Wurzeln mehr Eisen aus der Chlorid- und der Citrat-Form absorbieren, wegen des stärkeren Dissoziationsgrades, als aus der Chelat-Form. Ebenso wie bei den oberirdischen Teilen besaßen die Wurzeln der in neutraler Nährlösung gewachsenen Maispflanzen einen höheren Eisengehalt als bei nicht neutralisierter Nährlösung. Das traf vor allen Dingen für Eisenchlorid und Eisencitrat zu. Wahrscheinlich wird dieser Vorgang durch die Bildung von FeOH^{++} und $\text{Fe}(\text{OH})_2^+$ -Ionen begünstigt.

Die beschriebenen Wasserkulturversuche ergaben wichtige Beziehungen zwischen Pflanzenenertrag, Eisengehalt der Pflanzen und Konzentration verschiedener Eisen-Formen in der Nährlösung. Die Fe-Konzentration der Nährlösung und nicht der Eisengehalt der Pflanzen spielt die Hauptrolle bei der Ausbildung des Höchstertrages. Für die einzelnen Eisenformen wurden optimale Konzentrationen in der Nährlösung gefunden, die in mehreren Versuchen bestätigt wurden.

8. Die Eisernährung und das Mitscherlich-Ertragsgesetz.

Bei den vorliegenden Wasserkulturversuchen mit steigender Fe-Düngung, wurden wie aus allen Ertragskurven zu ersehen ist, bereits mit geringen Fe-Gaben (in drei verschiedenen Formen) hohe Ertragssteigerungen hervorgerufen. Eisen muß also einen hohen Wirkungswert besitzen. Genaue Zahlenangaben hierüber liegen jedoch im Schrifttum nicht vor.

Die Wirkung steigender Gaben eines Nährstoffes bzw. Düngemittels erfolgt nach dem Wirkungsgesetz der Wachstumsfaktoren.

"Der Pflanzenertrag steigt mit der Zufuhr eines Wachstumsfaktors proportional dem an einem Höchstertrage fehlenden Ertrage" (MITSCHERLICH 1948).

Im Anschluß an B. BAULE (1916) hat MITSCHERLICH die erste Annäherung seines Gesetzes für die Berechnung des Wirkungswertes eines Nährstoffes angegeben:

$$\log (A-y) = \log (A-a) - c \cdot x \quad (I)$$

wo A = der höchste Pflanzenertrag eines Versuches

y = der Ertrag, der durch die gedüngte Menge x eines Nährstoffes, bzw. durch die aufgenommene Menge x eines Nährstoffes erzielt wird.

a = der Ertrag ohne Zufuhr des Elementes

c = der Wirkungswert, des betreffenden Nährstoffes ist

Es ist zwar bekannt, daß das Eisen als unentbehrlicher Mikronährstoff den Ertrag sehr beeinflusst, jedoch liegen über seine speziellen Wirkungswerte bei den einzelnen Kulturpflanzen keine Hinweise vor, weder in Abhängigkeit von der Höhe der Düngenge (MITSCHERLICH 1948) noch in Abhängigkeit von der aufgenommenen Eisenmenge (RIPPEL 1926).

In der vorliegenden Arbeit wurde deshalb bei der Berechnung des Wirkungswertes von Eisen beide Prinzipien berücksichtigt.

Die Wirkungen des Eisens als Mikronährstoff, die sich, wie schon erwähnt, in einer starken Ertragssteigerung bei der Zufuhr geringerer Mengen bzw. in einer Ertragsdepression bei der Zufuhr ebenfalls relativ geringer Mengen äußern, machen die Berechnung des Wirkungswertes (c) dieses Nährstoffes schwierig.

Der unterschiedliche Verlauf der bei den vorliegenden Untersuchungen erhaltenen Ertragskurven bzw. die unterschiedlichen Einwirkungen verschiedener Eisenformen auf den Maisertrag, führten zu großen Abweichungen bei der Berechnung des c-Wertes.

Schwierigkeiten ergaben sich bei der Festsetzung des Wertes "A", des Höchstertrages. Bei der Berechnung des c-Wertes im zweiten Versuch des Jahres 1965 wurde für alle drei Eisenformen der Höchstertrag der Eisenchelatreihe von 30,2 g auch als Höchstertragswert für die Eisenchlorid- und Eisencitrat-Reihe angenommen. Bei den höheren Eisengaben war allgemein ein starkes Absinken des c-Wertes, bzw. waren starke Schwankungen zu verzeichnen. Bereits BAULE (1924) und REIDEMEISTER (1926) waren der Ansicht, daß die Konstanz des Wirkungsfaktors nicht zutreffen könne wenn die verschiedenen Wachstumsfaktoren der Pflanze in irgend einer Weise voneinander in ihrer Wirkung abhängig sind. ATANASIU (1958) fand, daß die Ursache der Inkonzanz von "c" in der Korrelation von c:A liege. Damit sei sie zusammenhängend gleichzeitig durch die gegenseitige Beeinflussung der Wachstumsfaktoren in ihrer Wirkung bedingt. Dies bezieht sich sowohl auf die Aufnahme während des Wachstums, als auch auf die physiologische Verwertung in der Pflanze. Sie findet Berücksichtigung durch das Nährstoffverhältnis, bzw. Verhältnis der Wachstumsfaktoren zueinander.

Die Gültigkeit des Wirkungsgesetzes hat ihre Grenzen! Bietet man zu große Mengen eines Wachstumsfaktors an, so tritt wiederum ein Ertragsabfall ein, der bei allzu großen Gaben schließlich ein Wachstum der Pflanze unmöglich macht.

Auch bei den vorliegenden Wasserkulturversuchen mit steigender Eisendüngung wurden, wie aus den Ertragskurven zu ersehen ist, Ertragsdepressionen hervorgerufen. Da diese Schädigung der Pflanzen mit der Zuführung des Eisens geschieht, so muß sie auch gleich mit dieser von vorneherein gegeben sein, wenn sie auch erst in einem späteren Stadium, d.h. bei größeren Gaben, augenfällig in Erscheinung tritt. MITSCHERLICH (1928), gemeinsam mit BEHRENS fügten zur Gleichung (I) einen weiteren Faktor, den "Schädigungsfaktor (k)", wie folgt, an:

$$y = A \cdot (1 - 10^{-c \cdot x}) \cdot 10^{-k \cdot x^2} \quad (II)$$

Die berechneten c-Werte für Fe im zweiten Versuch des Jahres 1965 zeigen die Inkonstanz dieses Wertes.

1. Berechnet man "c" nach der aufgenommenen Eisenmenge, so ergeben sich höhere Werte für "c" als unter Zugrundelegung des gedüngten Fe.
2. Bei der c-Wert-Berechnung nach der Düngung ergaben sich für die einzelnen Eisenformen die folgenden Werte für "c". Eisenchlorid 265, Fe-EDTA 198 und Eisencitrat 417. Bei Berechnung des c-Wertes nach der aufgenommenen Fe-Menge ergaben sich für Eisenchlorid 471, für Eisencitrat 746 und für Eisenchelat Werte zwischen 184 und 905.
3. Die Inkonstanz der erhaltenen c-Werte innerhalb dieses Versuches läßt die Berechnung des "Schädigungsfaktors (k)" sehr problematisch erscheinen.

C.B Zusammenhänge in der Eisenaufnahme und im Eisentransport in der Pflanze.

Die Aufnahme des Eisens besteht aus zahlreichen Vorgängen, die die Voraussetzung sind für seine physiologischen, bzw. biochemischen Funktionen in der Pflanze. Das unterschiedliche Verhalten der Maispflanzen gegenüber den drei verschiedenen Eisenformen zeigt, welche wichtige Rolle die Form des Eisens für die Aufnahme besitzt.

I Literaturüberblick

Die Aufnahme des Eisens hängt hauptsächlich von der Verfügbarkeit und der Konzentration dieses Elementes im Nährmedium ab. Hierbei spielt die Art der Pflanzen, bzw. ihr optimaler Eisenbedarf oft eine bedeutende Rolle. Der Mangel an verfügbarem Eisen im Nährmedium oder die nicht ausreichende Eisenzufuhr führen zur Eisenchlorose. Zahlreiche Autoren stellten eine starke Fe-Absorption an der Wurzeloberfläche chlorotischer Pflanzen nach der Eisenzufuhr fest. Diese Wurzeln akkumulierten das Eisen in höherer Konzentration als die Fe-Konzentration

on des Außenmediums es vermuten läßt. Die Heilung der Eisenchlorose durch Eisenzufuhr beweist, daß eine Beziehung zwischen dem absorbierten Eisen an der Wurzeloberfläche und dem in die oberen Teile der Pflanze translozierten Eisen besteht. BROWN (1963) stellt die Eisenaufnahme durch die Sojabohnenpflanzen in zwei Stufen dar:

- a) Die Fe-Absorption an den Wurzeln.
- b) Die Fe-Translokation von den Wurzeln zu den Pflanzenspitzen.

BRANTON und JACOBSON (1962) betrachten die Eisenaufnahme als ein von der Stoffwechselaktivität der Wurzelzellen abhängenden aktiven Prozess. Die beiden Autoren vermuten auf Grund ihrer Untersuchungen, daß die weitere Fe-Akkumulation in den Wurzelzellen von Eisenmangel-Pflanzen von der Intensität des Transportes dieses Elementes mit dem Saftstrom der Pflanze zu den oberirdischen Teilen abhängt. Die Autoren gaben weiter an, daß:

- a) die Verringerung der Transpirationsraten die Fe-Translokation zu den oberirdischen Teilen erniedrigt, und
- b) die Verhinderung der Fe-Akkumulation in den Wurzelparenchymzellen der Eisenmangel-Pflanzen die Eisentranslokation im Xylem zu den oberen Teilen erhöht.

Nach BROWN (1966) erhöht der Eisenmangel die Akkumulation von Citrat in den Wurzeln. Andererseits ist der Autor der Meinung, daß die Fe-Aufnahme hauptsächlich vom $\text{Fe}^{++}/\text{Fe}^{+++}$ -Verhältnis und nicht vom Citratgehalt der Wurzeln abhängt.

1. Der Eisentransport in der Pflanze.

Der Eisentransport zu den oberen Pflanzenteilen setzt einen Sättigungsgrad der Wurzeln mit diesem Element voraus. Nach BRANTON und JACOBSON (1962) müssen die Parenchymzellen der Wurzeln genügende Mengen Eisen akkumulieren, bevor es im Xylem zu den oberen Teilen transportiert wird. Der Autor fand durch radioautographische Untersuchungen, daß die Wurzelzellen der Eisenmangel-Pflanzen größere Mengen ^{59}Fe akkumulierten als die mit genügend Fe versorgten Wurzelzellen. Weiterhin translozierten die Eisenmangelpflanzen relativ geringe Mengen an ^{59}Fe zu den neu gebildeten Pflanzenteilen im Vergleich zu den mit genügend Eisen ernährten Pflanzen. Die Wurzeln der Eisen-

mangelpflanzen versuchten nach der Eisenzufuhr erst ihren Eisenbedarf zu decken, bevor das Eisen zu den oberen Teilen transportiert wurde. Das meiste zu den Blättern translozierte ^{59}Fe wurde durch die Gefäßbündel, speziell das Phloem und die Parenchymzellen am Rande der Adern transloziert. Im allgemeinen lokalisierte sich das translozierte ^{59}Fe im Blattmesophyll, wie es bei normalen grünen Pflanzen charakteristisch zu sein scheint.

Die Frage des Eisentransportes hat viele Autoren beschäftigt. Sie stellten die Eisentranslokation im Xylemsaft bzw. Exsudat dekapitierter Pflanzen fest. Das gleichzeitige Vorkommen von Citrat und Fe im Exsudat, führte zur Vermutung, daß das Citrat am Eisentransport beteiligt sei. Zahlreiche Autoren verbinden den Eisentransport mit dem Metabolismus der organischen Säuren in der Pflanze. In den Untersuchungen von BROWN und TIFFIN (1965) wurde das im Exsudat translozierte Eisen elektrophoretisch abgetrennt. Hierbei bewegte sich das Eisen zur Anode. Die Wanderung als Anion weist darauf hin, daß dieses Element mit anderen negativ geladenen Verbindungen assoziiert war. Die Autoren stellten eine Erhöhung der Citratkonzentration im Exsudat bei steigender Eisenkonzentration der Nährlösung bzw. erhöhte Eisenaufnahme fest.

Die Hemmung der Eisenaufnahme durch Zn setzte auch die Citratkonzentration des Exsudats herab. In diesen Untersuchungen konnte keine Beziehung zwischen der Menge des Exsudats und dem Eisentransport festgestellt werden.

Nach TIFFIN (1966) hat das Stengelexsudat bei niedriger Citratkonzentration gleichzeitig einen geringen Fe-Gehalt. Der Autor ist der Meinung, daß das Citrat/Fe-Verhältnis im Exsudat von der Eisenkonzentration der Nährlösung abhängt. Die Citratkonzentration des Exsudats steigt bei Eisenzufuhr bis zu einer bestimmten Konzentration an, danach sinkt sie wieder ab. LINGLE und Mitarbeiter (1963) stellten fest, daß in Sojabohnenpflanzen die Hauptmenge des Eisens in Fe-Malat-oder Fe-Malonat-Form zur Pflanzenspitze transloziert wurde. TIFFIN (1966) ermittelte niedrige Fe-und Citrat-Konzentrationen im Exsudat normaler grüner Pflanzen. Weiterhin konnte er Fe-Citratkomplexe in diesem Exsudat elektrophoretisch nachweisen. Der Autor ist der

Ansicht, daß 1/15 der Citratkonzentration der Pflanze für den Eisentransport ausgenutzt wird. Der Rest wird von der Pflanze für das Aufrechterhalten der Löslichkeit anderer Metalle verwendet. Nach BROWN (1966) war das Fe/Citrat-Verhältnis im Stengelexsudat nicht das gleiche wie im Wurzelsaft. Eisenmangel erhöhte die Akkumulation der Citrate im Wurzelsaft. Eine Erhöhung in der Citratkonzentration im Stengelexsudat konnte aber nicht festgestellt werden. Der Autor ist der Ansicht, daß das Fe/Citrat-Verhältnis keine konstante Relation ist, denn sie hängt von der Stärke des Fe-Mangels und von anderen Ernährungsfaktoren der Pflanzen ab. Voraussetzung für die Translokation des Eisens mit dem Exsudat-Strom der Pflanze ist eine spezifische Menge an aufnehmbarem Fe und nicht eine bestimmte Citratmenge in den Wurzeln. Der Autor vermutet, daß das Eisen vielleicht für die Funktion der Citrate essentiell sein mag. Nach der Eisenzufuhr zu den chlorotischen Sojabohnenpflanzen wird das in den Wurzeln akkumulierte Citrat für die Eisentranslokation verwendet.

2. Verschiedene Theorien für die Aufnahme von Eisenchelatverbindungen.

Auf diesem Gebiet gibt es widersprüchliche Meinungen. HALE-VERDE und WALLACE (1964) stellten die Bedeutung der Chelatverbindungen in zwei Fragen dar:

- a) Wie erleichtert die Chelatverbindung die Fe-Translokation innerhalb der Pflanze?
- b) Wie erhöht die Zufuhr einer Chelatverbindung (z.B. EDDHA) die Wirksamkeit des Eisens bei physiologischen Reaktionen in den Blättern, obwohl es bereits dorthin transloziert war?

Bei der Chelatwirkung unterscheiden manche Autoren zwischen den Pflanzen zugeführten Chelaten und den in den Pflanzen vorkommenden. Darüber hinaus unterscheiden sie zwischen der Absorption bzw. der Aufnahme einerseits des Eisens und andererseits der Chelatkomponente bei Zufuhr eines Eisenchelats.

Ursprünglich wurde die Meinung vertreten, daß das gesamte Eisenchelat-Molekül an den Pflanzenwurzeln absorbiert und ungespalten zu den Blättern transportiert wird. HILL-COTTINGHAM

(1957) pflanzte junge Tomatenpflanzen aus voller Nährlösung in eine nur Fe-EDTA enthaltende Lösung. Durch spektralphotometrische Untersuchungen stellte der Autor eine gleich starke Erniedrigung sowohl des Fe- als auch der EDTA-Konzentration in der Lösung fest. Diese Feststellung unterstützte die Meinung, daß der Eisenchelatkomples als ganzes Molekül durch die Pflanzenwurzeln absorbiert wird. Ob das Chelatmolekül auch als ganzes Molekül zu den oberen Teilen der Pflanze transloziert wird, konnte in diesen Untersuchungen nicht geklärt werden. Andererseits konnten TIFFIN und Mitarbeiter (1960) radioaktives Eisen in chelatischer Bindung im Exsudat von Pflanzen, die nicht mit Eisenchelatverbindung ernährt wurden, bestimmen. Dies weist auf natürlich vorkommende Chelate in der Pflanze hin. Viele Autoren sind der Meinung, daß mit einer Trennung der beiden Komponenten (Fe und Chelat) der zugeführten Eisenchelatverbindung an der Wurzeloberfläche gerechnet werden muß. Andere Autoren betrachten die Chelatverbindungen als "Carrier", die viele Metalle absorbieren können. Sie selbst werden jedoch nicht absorbiert. Der Befund mancher Autoren, daß die Wurzeln verschiedener Pflanzenarten Fe-freie Chelatverbindungen absorbieren und transportieren können, bekräftigt die Vermutung einer möglichen Aufnahme der Chelatkomponente der verschiedenen Metallchelate. Zu dieser Auffassung neigen auch TIFFIN und Mitarbeiter (1960). Sie konnten eine geringe EDDHA-Menge im Exsudat der mit Fe-EDDHA ernährten Pflanzen feststellen. Die gefundene EDDHA-Menge im Exsudat war allerdings viel geringer als der gesamte Eisengehalt des Exsudats. Dies läßt vermuten, daß die beiden Komponente der Eisenchelatverbindung an der Wurzeloberfläche voneinander getrennt wurden, wobei die Pflanzen mehr Eisen aufgenommen haben und der größte Teil der Chelatkomponente dieser Verbindung in der Nährlösung blieb bzw. an den Wurzeln zurück gehalten wurde. Die Autoren ernährten weiterhin Bohnenpflanzen mit $^{59}\text{Fe}/^{15}\text{N}$ markiertem Fe-EDTA. Hierbei wurden die beiden Isotopen in verschiedenen Pflanzenteilen bestimmt. Das $^{59}\text{Fe}/^{15}\text{N}$ -Verhältnis in der Pflanze weist darauf hin, daß die Aufnahme bzw. Translokation und Akkumulation dieser beiden Komponenten nicht in äquivalentem Verhältnis erfolgt. Weiterhin gibt das veränderte

$^{59}\text{Fe}/^{15}\text{N}$ -Verhältnis an den Wurzeln, im Vergleich zu dem in der Nährlösung einen Beweis für die Trennung der beiden Fe-EDTA-Komponenten an der Wurzeloberfläche. WALLACE (1963) betrachtet die Ausfällung des Eisens in den Wurzeln durch Phosphat als Beweis für die Trennung der beiden Fe-EDTA-Komponenten an oder in den Wurzeln. Der Autor führte Wasserkulturversuche durch, in denen Bohnenpflanzen mit verschiedenen Eisenchelatverbindungen ernährt wurden, bei denen entweder ihre Karboxylgruppen oder Äthylengruppen mit ^{14}C markiert waren. Die Untersuchungen stellten einen Abbau der aufgenommenen Fe-Chelatverbindung in der Pflanze fest. Nach TIFFIN (1966) wurden Sonnenblumen und Sojabohnen-Pflanzen mit einer synthetischen Eisenchelatverbindung ernährt. Die Pflanzenwurzeln absorbierten eine große Eisenmenge, und der größte Teil der Chelatkomponente blieb im Nährmedium zurück.

II Eigene Untersuchungen

In diesen Untersuchungen mit jungen Sonnenblumpenpflanzen (*Helianthus annuus*) sollten die Absorption des Eisens an den Wurzeln, Translokation und Akkumulation des aufgenommenen Eisens bei Ernährung mit ^{59}Fe markiertem Fe-Chlorid, Fe-EDTA und Fe-Citrat untersucht werden. Zur Sicherung der Ergebnisse wurde der gleiche Versuch nacheinander dreimal wiederholt.

1. Methodik

1.1. Pflanzenanzucht

Verwendet wurde die Sonnenblumen-Sorte "Slovenska-Bucianska", die nach HÖFNER (1964), HÖFNER und HERWIG (1966) sich in mehreren Versuchen als besonders geeignet erwies. Nach der Keimung zwischen befeuchtetem Filterpapier wurden die Keimlinge mit etwa 1 cm langen Wurzeln am 4. Tag auf ein großmaschiges Kunststoffnetz gesetzt und in destilliertem Wasser vier weitere Tage wachsen gelassen. Die etwa 3 cm hohen Keimpflanzen wurden am 8. Tag, je 6 Pflanzen in ein 100 ml fassendes Reagenzglas mit einer vollkonzentrierten eisenfreien Nährlösung (Zusammensetzung Seite 87), umgepflanzt. Mit Schaumgummistreifen wurden die Keimpflanzen im Reagenzglas gehalten. Die Reagenzgläser standen in einem mit einer Lochplatte versehenen Kasten aus Vinidur, so daß sich die Pflanzenwurzeln im Dunkeln befanden. Am 11. Tag wurde die eisenfreie Nährlösung nochmals gewechselt, und am 12. Tag vormittags erfolgte die Überführung in Nährlösungen, die außerdem 0,1 und 1,0 ppm Fe nicht markiertes Eisen in den genannten Formen enthielten. Am Nachmittag des gleichen Tages wurde das nicht markierte Eisen durch entsprechende Mengen von ^{59}Fe -markierten Eisenformen ersetzt. Es wurde genauestens darauf geachtet, daß die zum Festhalten der Pflanzen dienenden Schaumgummistreifen mit der radioaktiven Lösung nicht in Berührung kamen, um eine Übertragung von ^{59}Fe auf die äußeren Teile der Pflanzen zu vermeiden.

1.2. Weitere Bearbeitung.

Am 13. Tag (Mittwochs) um 8⁰⁰ h wurden die Pflanzen aller Versuchsreihen 3 cm über den Schaumgummistreifen abgeschnitten. Gleichzeitig erhielt jeder Stengelstumpf ein 5 cm langes Polyäthylenröhrchen aufgesetzt; die Abdichtung erfolgte notfalls mit einem plastischen, pflanzenphysiologisch unschädlichen Kitt (Prestik).

Das in den Polyäthylenröhrchen während 48 Std. aufsteigende Exsudat wurde abgesaugt und gesammelt. Die erhaltene Exsudatmenge wurde ermittelt.

Die abgeschnittenen Sonnenblumen wurden gewogen und anschließend in Bechern aus Kunststoff bei -15°C in einem Gefrierschrank 5 Std. lang eingefroren.

Folgende Untersuchungen wurden vorgenommen:

- a) Messung der Radioaktivität im gesammelten Exsudat.
- b) Messung der Radioaktivität in den einzelnen Teilen der Sonnenblumen. Hierzu wurden die einzelnen Pflanzenteile mit einer Na-Citrat gepufferten m/100-EDTA-Lösung vom pH 6,6 extrahiert.

Herstellung der Extraktionslösung:

47 ml 0,1 n NaOH + 53 ml 0,1 m Na-Citratlösung.

Die Na-Citratlösung wird aus 21 g Citronensäure (monohydrat) + 200 ml 1 n NaOH angesetzt und bis 1 l aufgefüllt. Zum Auflösen aller Reagenzien dieser Extraktionslösung diente eine m/100 EDTA-di-Na-Salz (3,7225 g in 1 l aqua dest.)-Lösung.

Die 5 Std. im Gefrierschrank gefrorenen, abgeschnittenen Sonnenblumen wurden herausgenommen und unter normale Raumtemperatur gestellt. Hierbei zerfiel das Pflanzengewebe völlig. Nach Zusatz von 80 ml Extraktionslösung wurden die Pflanzen mit Hilfe eines Glasstabes zerdrückt. Die Suspension wurde 2 Std. zum völligen Extrahieren stehen gelassen und anschließend durch Blauband-Filterpapier filtriert. Der Filtrerrückstand wurde mit je 5 ml Extraktionslösung zweimal gewaschen. Nach dem Trocknen wurde das Filter mit Rückstand in Porzellanschalen im Muffelofen mit langsamer Temperaturerhöhung bis 500°C verascht. Der Rückstand wurde mit 30 ml 1 n HCl aufgenommen. Im 2. und 3. Versuch wurden die Sten-

gelstümpfe von den Wurzeln getrennt, im Muffelofen verascht und in 1 n HCl aufgelöst.

- c) Ebenfalls wurden im 2. und 3. Versuch die Pflanzenwurzeln aus den radioaktiven Nährlösungen entfernt, mit ^{59}Fe freier, aber inaktives Eisen, je nach Behandlung, enthaltender Nährlösung gewaschen, an der Luft getrocknet und im Muffelofen bei 500°C verascht. Die Rückstände wurden je in 30 ml 1 n HCl aufgelöst.

2. Versuchsergebnisse:

- a) Der pH-Wert der Nährlösung wurde durch unterschiedliche Fe-Form und erhöhte Fe-Konzentration nicht verändert.
- b) Die Sonnenblumenpflanzen zeigten keinen bestimmten Rhythmus in der Ausscheidung des Exsudats. Im allgemeinen schieden die Pflanzen morgens größere Exsudatmengen aus als abends; im Laufe der Zeit nach dem Abschneiden nahm die ausgeschiedene Exsudatmenge wesentlich ab.
- c) Die Einzelergebnisse der Messung der Radioaktivität von allen drei Versuchen sind in (Tab. 37) zusammengestellt. Jede Zahl ist ein Mittelwert der vier Einzelwerte die aus den vier Parallelgläsern gewonnen wurden. Da die Ergebnisse der drei Versuche ähnlich sind, wurde aus ihnen der Gesamtdurchschnitt ermittelt (Tab. 38). Die hier angegebenen Prozentwerte beziehen sich auf das gesamte aufgenommene ^{59}Fe . Aus den Tabellen geht hervor:
- c.a) Bei allen drei Eisenformen absorbierten die Wurzeln aus 0,1 ppm Fe relativ größere Eisenmengen, als aus der 1,0 ppm Fe enthaltenden Nährlösung.
- c.b) Das Stengelexsudat der mit 1,0 ppm Fe-haltiger Nährlösung ernährten Pflanzen, enthielt mehr ^{59}Fe als das der in 0,1 ppm Fe-haltiger Nährlösung gewachsenen Pflanzen.
- c.c) Bei Eisencitratbehandlung besaß das Exsudat den höchsten Fe-Gehalt. Danach folgt das Exsudat bei Eisenchelat- und zuletzt das bei Eisenchloridbehandlung.
- c.d) Die Ernährung mit Eisenchelat und Eisencitrat erhöhte den ^{59}Fe -Gehalt der oberirdischen Pflanzenteile stärker als Eisenchlorid. Bei den Wurzeln ergab sich das umgekehrte Bild.

Tab. 37

Die Verteilung von ^{59}Fe in jungen Sonnenblumenpflanzen

(drei Parallelversuche)

Ver- such	Fe- Form	ppm Fe der Nähr- lö- sung	Die Exsu- dat- menge in 48 Std. (ml)	Die gesamte Radioaktivität nach 48 Std (imp/min)					aufge- nommenes ^{59}Fe in %
				im Stengel Exsudat	in Ober. Teilen (Extrakt)	in Ober. T. Rest n.d. Ex- trahieren	Nur i. 2. u. 3. Versuch in den Zwisch- Teilen	in d. Wur- zeln	
I	Fe- CHLORID	0,1	0,70	2495	630	153	-	-	0,43
		1,0	0,61	3169	613	260	-	-	0,53
	Fe- EDTA	0,1	0,50	4088	2671	1337	-	-	1,08
		1,0	1,06	11010	3937	1133	-	-	2,14
	Fe- CITRAT	0,1	0,65	7211	2195	890	-	-	1,37
		1,0	0,90	9736	3924	1086	-	-	1,96
II	Fe- CHLORID	0,1	0,38	5152	1109	479	725	8227	2,39
		1,0	0,53	4023	758	362	295	5252	1,63
	Fe- EDTA	0,1	0,99	5988	2263	2094	565	5517	2,50
		1,0	0,72	9893	2516	1771	402	1723	2,48
	Fe- CITRAT	0,1	0,97	5100	1430	1307	495	3453	1,79
		1,0	1,23	13635	3507	1692	381	1794	3,20
III	Fe- CHLORID	0,1	0,96	2764	236	114	222	3348	0,86
		1,0	0,92	12377	458	397	277	1981	2,00
	Fe- EDTA	0,1	0,79	4820	272	139	269	2683	1,06
		1,0	0,46	7611	762	327	226	875	1,27
	Fe- CITRAT	0,1	0,72	7285	628	299	333	3100	1,50
		1,0	0,70	10133	653	312	221	2210	1,75

Tab. 38

Die Verteilung von ^{59}Fe in jungen Sonnenblumenpflanzen.

(Mittelwerte aus drei Parallelversuchen)

Fe-Form	ppm Fe der Nähr-lösung	Exsudat-menge in 48 Std. (ml)	Die gesamte Radioaktivität nach 48 Std. (imp/min)				
			im Stengel-Exsudat	in Ober.T. (Extrakt)	in Ober.T. Rest n.d. Extrahieren	Nur i.2.u.3. Versuch i.d.Zwischent.	in den Wurzeln
Fe-CHLORID	0,1	0,68	(32,7%) 3470	(6,2%) 658	(2,3%) 249	(4,4%) 473	(54,5%) 5787
	1,0	0,69	(57,3%) 6523	(5,3%) 610	(2,9%) 340	(2,5%) 286	(31,7%) 3616
Fe-EDTA	0,1	0,76	(40,0%) 4965	(13,9%) 1735	(9,5%) 1190	(3,3%) 417	(33,0%) 4100
	1,0	0,91	(65,1%) 9505	(16,4%) 2405	(7,3%) 1077	(2,1%) 314	(8,8%) 1299
Fe-CITRAT	0,1	0,78	(52,3%) 6532	(11,3%) 1418	(6,6%) 832	(3,3%) 414	(26,2%) 3276
	1,0	0,94	(66,2%) 11168	(14,0%) 2361	(6,1%) 1030	(1,7%) 301	(11,8%) 2002

3. Diskussion

Sonnenblumenpflanzen wurden vor dem Abschneiden etwa 8 Std. mit nicht markiertem Fe in den erwähnten Konzentrationen, und anschließend 15 Std. lang mit ^{59}Fe -haltigen Nährlösungen ernährt. Durch die 8 stündige Vorbehandlung mit nicht markiertem Fe wurde erreicht, daß eine gewisse Absättigung der Pflanzen mit Eisen insbesondere an den Wurzeln eintrat, sodaß nunmehr Aufnahme und Transport des markierten Eisens verfolgt werden konnte.

Die Untersuchungen ergaben, daß bei allen drei Eisenformen die Pflanzenwurzeln in der Nährlösung mit 0,1 ppm Fe mehr Eisen absorbierten als in der 1,0 ppm Fe enthaltenden Nährlösung. Das ist darauf zurückzuführen, daß unter Eisenmangelverhältnissen der Nährlösung die Wurzelzellen größere Eisenmengen akkumulieren, bevor das Eisen zu den oberirdischen Teilen transloziert wird. Bei normaler Fe-Konzentration der Nährlösung ist das nicht der Fall. Hier haben die Wurzeln ihren Bedarf an Eisen gedeckt. Die vorherigen Ergebnisse der Wasserkulturversuche, welche ebenfalls die Bedeutung einer ausreichenden Fe-Konzentration der Nährlösung herausstellten, wurden somit erneut bestätigt.

Voraussetzung für eine normale Fe-Versorgung der Pflanzen und damit ein normales Wachstum, ist die Fe-Akkumulation in den Wurzeln in einer bestimmten Höhe. Erst wenn diese Anreicherung der Wurzeln mit Fe erreicht ist, erfolgt eine normale Versorgung der oberirdischen Teile der Pflanzen. Die Wurzeln der mit Eisenchlorid ernährten Pflanzen enthielten den höchsten Gehalt an ^{59}Fe . Trotzdem kam die in den Wasserkulturversuchen festgestellte Fähigkeit der Wurzeln, größere Eisenmengen in Chlorid- und Citrat-Formen zu absorbieren, in diesen Versuchen mit jungen Sonnenblumenpflanzen nicht klar zum Ausdruck, wahrscheinlich wegen der kürzeren Versuchsdauer, aber auch wegen der niedrigen vorgelegten Fe-Konzentration.

Die Messung der Radioaktivität im Stengelexsudat ergab eine deutliche Beziehung zwischen dem an den Wurzeln absorbierten bzw. in den Wurzeln akkumulierten Eisen und dem im Exsudat translozierten Eisen. Im allgemeinen enthielt das Stengelexsu-

dat bei 0,1 ppm Fe in der Nährlösung (mit stärkerer Eisenabsorption an den Wurzeln) weniger ^{59}Fe als die Pflanzen, die in 1,0 ppm Fe haltiger Nährlösung (mit niedrigerer Eisenabsorption an den Wurzeln) wuchsen. Eine bestimmte Relation zwischen der Ernährung mit den verschiedenen drei Eisenformen und der ausgeschiedenen Exsudatmenge konnte in diesen Untersuchungen nicht festgestellt werden. Ebenfalls bestand keine sichere Beziehung zwischen der ausgeschiedenen Exsudatmenge und ihrem ^{59}Fe -Gehalt.

Ein weiterer wichtiger Befund ist die Erhöhung des ^{59}Fe -Gehaltes des Exsudats durch die Ernährung mit Eisencitrat und Eisenchelat. Obwohl hierbei die Frage, in welcher Form das Eisen transloziert wurde, nicht beantwortet wird, muß man jedoch die Erhöhung der ^{59}Fe -Gehalte des Exsudats der mit den beiden genannten Eisenformen ernährten Sonnenblumenpflanzen auf die Wirkung der Citrat- bzw. der Chelatkomponente zurückführen. Die Pflanzen translozierten mehr ^{59}Fe bei der Ernährung mit diesen beiden Fe-Formen, möglicherweise auf Grund der Aufnahme von Citrat oder EDTA oder deren Abbauprodukte.

Die in der Literatur von zahlreichen Autoren erwähnte bedeutende Rolle der Citrate in der Eisenaufnahme bzw. im Eisenexport in der Pflanze, wurde so durch die eigenen Untersuchungen erneut bestätigt.

In den oberirdischen Teilen war $2/3$ bis $3/4$ des in 15 Std. aufgenommenen ^{59}Fe in EDTA-Extraktionslösung noch löslich, während der Rest entweder bereits in Zellstrukturen eingebaut oder anderweitig fixiert wurde.

C.C Der Einfluß des Eisens auf den Proteinstoffwechsel in der Pflanze.

Die Unentbehrlichkeit des Eisens für das Pflanzenwachstum, die durch Untersuchungen zahlreicher Autoren sowie durch die eigenen Untersuchungen deutlich bewiesen wurde, erklärt die Bedeutung dieses Elementes für den weiteren Verlauf wichtiger physiologischer bzw. biochemischer Prozesse in der Pflanze. Die Abhängigkeit der Proteinsynthese in der Pflanze von ihrem Ei-

senhaushalt stellt eine der wichtigsten Lebensfunktionen des Eisens dar.

I Literaturüberblick

Die Beziehungen zwischen Chlorophyllgehalt und Proteingehalt sind seit langen bekannt. In den Untersuchungen von WELKIE und MILLER (1960) enthielten chlorotische Tabakpflanzen 25-30% weniger Protein als die normalen. Ob die Abnahme des Proteingehaltes der chlorotischen Pflanzen am gesamten Protein oder an speziellen Proteinen entstand, konnten die beiden Autoren nicht klar identifizieren. Sie vermuteten aber, daß die größte Abnahme im Chloroplasten-Protein eintrat.

Nach SHETTY und MILLER (1966) reguliert das Eisen die Synthese verschiedener spezifischen Proteine. Die Depression im Proteingehalt der chlorotischen Pflanzen entsteht entweder durch schwache Proteinsynthese oder durch die Degradation des schon in der Pflanze vorhandenen Proteins. Die Autoren stellten eine Erhöhung im Gehalt an Chloroplasten- und Cytoplasma-Protein bei Pflanzen fest, die von der Fe-Chlorose nach der Eisenzufuhr geheilt worden waren.

BENNET (1945) bezeichnete das bei Chlorophyllbildung produzierte Protein als "Aktives Protein". Das neu gebildete Chlorophyll, das aktive Protein und das aktive Eisen sollen proportional zueinander sein. Weiterhin soll das Protein eine bedeutende Bindungskapazität für Eisen besitzen.

ILJIN (1951) fand in den chlorotischen Blättern beachtlich größere Mengen an N als in gesunden Blättern. Manchmal erreichte der Gehalt an löslichem N in den chlorotischen Blättern 5-15 mal höhere Werte als in den normalen. Insbesondere enthielten die chlorotischen Blätter einen wesentlich höheren Gehalt an Aminostickstoff, Amidstickstoff und löslichem Protein. In den normalen Blättern waren 94-96% des gesamten N-Gehaltes unlöslich. Die jungen normalen Blätter enthielten 80% des gesamten N in unlöslicher Form. Die chlorotischen Blätter dagegen enthielten nur 30-40% des gesamten N in unlöslicher Form. Bei unnormalen Gehalten an löslichen und unlöslichen N-Verbindungen im Zellsaft muß mit einer Störung der physiologischen Aktivi-

tät dieser Zellen gerechnet werden. Solche Störungen führen zur Hemmung der Synthese von Chlorophyll und anderen Pigmente, also typischen Eisenmangelsymptomen.

Nach PERUR und Mitarbeitern (1961) führt bei der Blockierung der Proteinbildung durch Fe-Mangel die weitere N-Absorption zur Akkumulation von nicht Protein-N in den chlorotischen Blättern, die ein niedriges Verhältnis von Protein-N/Gesamt-N besitzen. In diesen Untersuchungen verursachte die Eisenchlorose eine Reduktion im Proteingehalt der Chloroplasten-Fraktion der Blätter von mehr als 82%.

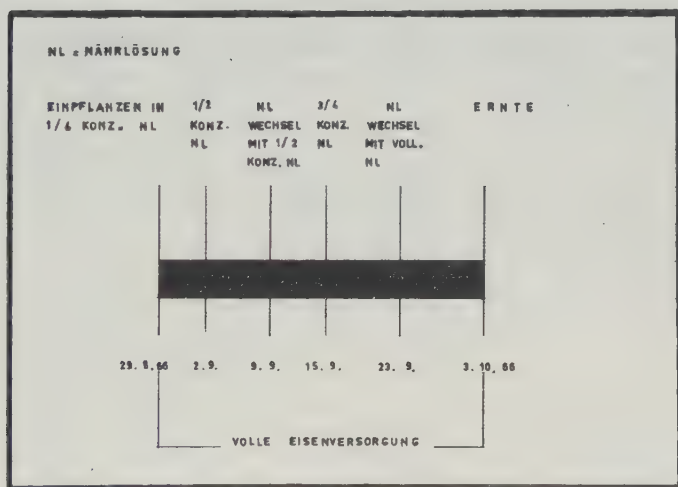
Die Untersuchungen von DEKOCK und MORRISON (1958) widersprechen der Meinung, daß die chlorotischen Blätter einen größeren Gehalt an löslichen N-Verbindungen besitzen als die normalen. Die beiden Autoren stellten eine Abnahme im Gehalt an freien Aminosäuren in den chlorotischen Blättern von Pflanzen fest, deren Eisenchlorosesymptome auf die Auswirkung von Schwermetallen oder auf genetische und virologische Ursachen zurückgeführt werden konnten. Nach ihrer Ansicht hängt der Gehalt der Blätter an freien Aminosäuren auch vom P/Fe-Verhältnis in diesen Blättern ab.

HOLLEY und CAIN (1955) stellten eine hohe Konzentration an freiem Arginin in den chlorotischen Pflanzen fest. Zum selben Ergebnis führten auch die Untersuchungen anderer Autoren bei Mn-Mangel-Pflanzen. Nach PERUR und Mitarbeitern (1961) erhöht der Eisenmangel die Konzentration der freien Asparaginsäure und Glutaminsäure.

Wenige Angaben im Schrifttum geben Auskunft über den Einfluß des Eisens auf die Synthese der einzelnen Aminosäuren. In den folgenden eigenen Untersuchungen sollte deshalb versucht werden, einige Zusammenhänge zwischen der Eisenernährung und dem Proteinstoffwechsel näher aufzuklären.

II Eigene Untersuchungen

Hierzu wurde im Sommer 1966 ein Wasserkulturversuch mit Mais und der gleichen Nährlösung wie bei den früheren Untersuchungen angelegt. In eine 1/4 konz. Nährlösung umgepflanzten Maiskeimlinge wurden mit den Eisenstufen 0,2; 6,4; 25,6 und 204,8 ppm Fe als Fe(III)-EDTA-Na-Salz (je 2 Parallelgefäße) ernährt. Das folgende Schema stellt den Verlauf des Versuches dar:



Die Ernte erfolgte zu zwei Terminen am 15.9. und 3.10.1966, bei denen je 1 Gefäß jeder Eisenstufe geerntet wurde. Folgende Untersuchungen wurden vorgenommen:

- Bestimmung der freien Aminosäuren (in Alkohol lösliche Fraktion) mit Hilfe der zweidimensionalen Papierchromatographie (nach THOMPSON und STEWARD 1951).
- Bestimmung des N-Gehaltes der in Alkohol unlöslichen Fraktion mit der Kjeldahl-Methode.

1. Untersuchungsmethoden.

Je zwei der vier Maispflanzen eines Gefäßes wurden zusammengefaßt. Es ergaben sich somit aus jedem Gefäß bzw. aus jeder Versuchsreihe 2 biologische Parallelen bei jeder der beiden Ernten. Hierbei wurden Sprosse und Wurzeln getrennt geerntet und frisch gewogen. Vor dem Wiegen wurden die Wurzeln mehrmals mit aqua dest. gewaschen und einige Minuten an der Luft getrocknet. An jeder der 2 biologischen Parallelen wurden mindestens 2 analytische Parallelbestimmungen vorgenommen.

1.1. Die Bestimmung des in Alkohol löslichen N.

a) Die Extraktion der alkohollöslichen Aminosäuren.

Die Maispflanzen (oberirdische Teile und Wurzeln) wurden 3 mal für 24 Std. mit absolutem Äthanol extrahiert, wobei die 3. Extraktion mit heißem Äthanol (Siedepunkt 70°C) erfolgte. Durch das dreimalige Extrahieren gehen mindestens 99% der löslichen Aminosäuren ins Äthanol über. Der gesammelte Extrakt wurde im Umlufttrockenschrank bei $50-55^{\circ}\text{C}$ getrocknet.

Die eingetrockneten Extrakte wurden mehrmals mit aqua dest. und Chloroform (1:1) quantitativ aufgenommen. Hierbei gehen Chlorophyll und fettartige Bestandteile in die Chloroformphase über. Zwischen der wässrigen und der Chloroformphase bildet sich eine lipoidartige Schicht. Nach dem Entfernen der Chloroformphase konnte die Zwischenphase durch Filtrieren mit Blauband-Filterpapier beseitigt werden. Das Filterpapier wurde anschließend mehrmals mit aqua dest. sorgfältig gewaschen, um Verluste an löslichen AS zu vermeiden. Die Zwischenphase erwies sich als frei von AS. Das Filtrat (wässrige Phase) wurde quantitativ auf mit Dowex-Kationenaustauscher (50 x 4, 100-200 mesh) gefüllten Säulen (25 cm Gesamtlänge) gereinigt. Die vom Kationenaustauscher festgehaltenen AS wurden nach dem Neutral-Waschen mit 70 ml 2 n NH_4OH eluiert. Dieses Eluat wurde im Umlufttrockenschrank bei $50-55^{\circ}\text{C}$ eingedampft, mit 2 ml aqua dest. aufgenommen und in gut verschlossenen Deckelgläsern bis zur weiteren Bearbeitung aufbewahrt. Zur Vermeidung von Bakterien- und Pilzbefall empfiehlt es sich, dieser Lösung einige Tropfen Chloroform zuzugeben.

b) Die Herstellung der Chromatogramme.

Die Menge der auf die Chromatogramme (Filterpapier Whatmann Nr. 1) aufzutragenden AS-haltigen Lösungen wurde für jedes Versuchsglied in Vorproben ermittelt. Hierbei wurden 20 µl Probelösung punktförmig auf einen Streifen des Chromatographiepapiers aufgetragen, getrocknet, mit Ninhydrin-Lösung (1% Ninhydrin, 2% Collidin-Lutidin-Wasser (1:3:2), 97% abs. Äthanol) befeuchtet und im Trockenschrank bei 90°C zur Farbreaktion nochmals getrocknet. Die Farbtintensität dieses Spots bildet die Grundlage zur Berechnung der auf kleine Chromatogramme (13x13) aufzutragenden Lösungsmenge. Die kleinen Chromatogramme wurden in luftdicht abgeschlossenen kleinen Glastanks zweidimensional nach dem aufsteigenden Verfahren, im Laufgemisch Phenol/Wasser (pH 5,6) und nach der Trocknung im Laufgemisch Butanol/Eisessig-Wasser (8:1:4) entwickelt.

Waren die Trennung und Konzentration der einzelnen Aminosäuren befriedigend, so wurde die achtfache Menge der AS-haltigen Lösung auf die eigentlichen Chromatogramme (46 x 57 cm Whatmann Nr. 1) in Portionen von 20 µl aufgetragen. Zwischen den einzelnen Auftragungsgängen wurde die aufgetragene Lösungsmenge mit einem Föhn (Warmluftstrom) getrocknet.

Die Papiere wurden dann über Nacht in die Entwicklungskammer gehängt, in welcher die Atmosphäre mit dem zur Entwicklung verwendeten Laufgemisch gesättigt war. Danach folgte die Entwicklung der Chromatogramme. Hierbei wurden die Chromatogramme mit der Ninhydrinlösung gleichmäßig getränkt, in eine spezielle Anfärbekammer eingehängt und dort bei 60°C in einer äthanolgesättigten CO₂-Atmosphäre eine halbe Stunde zum quantitativen Ablauf der Ninhydrin-Reaktion belassen. Dann wurden die angefärbten Chromatogramme etwa 7 Minuten bei normaler Temperatur getrocknet.

Zur Identifizierung der Aminosäuren wurden die Chromatogramme auf eine Lichtplatte gelegt, die AS-Farbflecken mit Bleistift umrandet, bzw. nummeriert (Abb. 30), ausgeschnitten, gewogen und kleingeschnitten. Die Extinktionen der einzelnen Farbflecken wurden, nach der Elution (mindestens eine halbe Stunde)

Die einzelnen Aminosäuren werden auf dem Chromatogramm mit folgenden Nummern bezeichnet (Abb. 30):

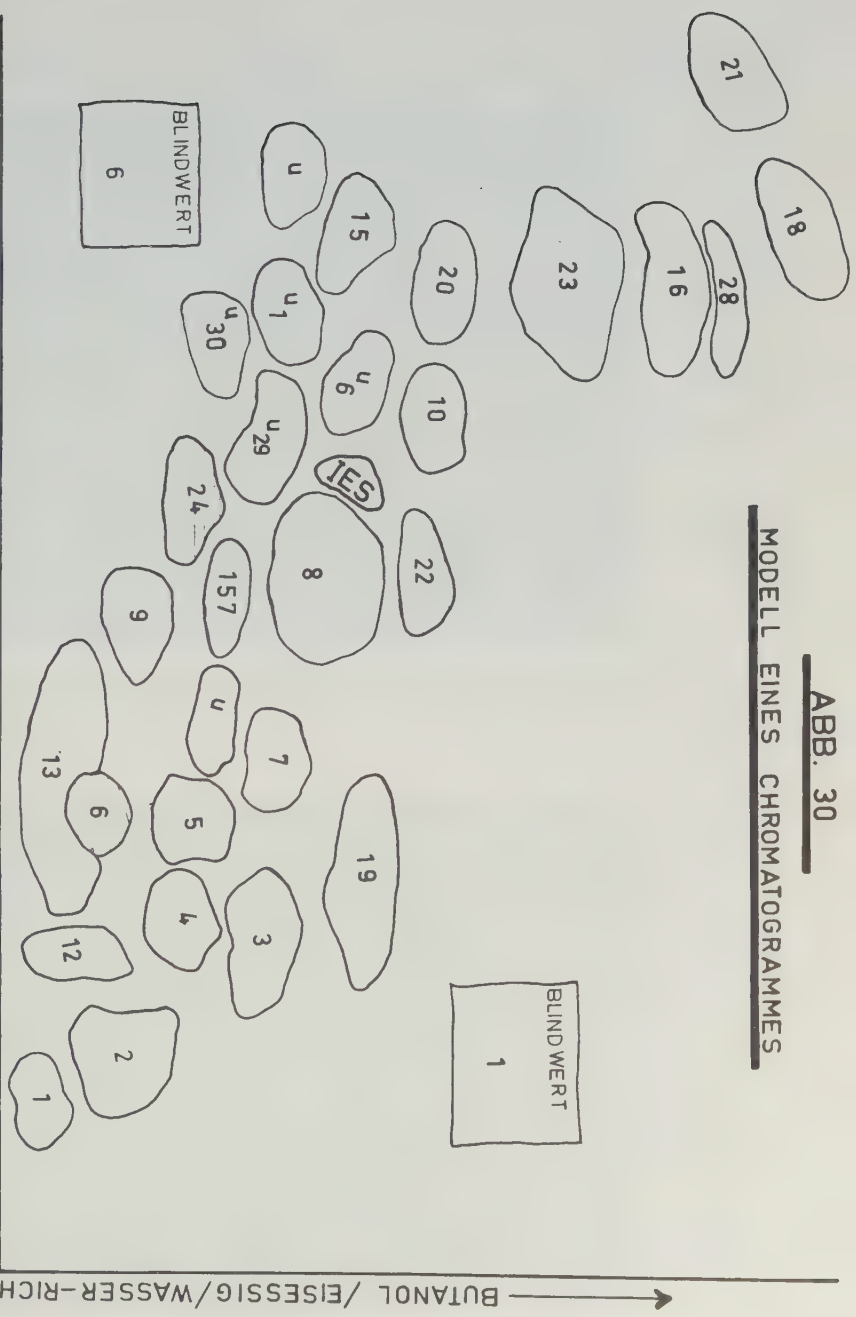
1. Cystein
2. Asparaginsäure
3. Glutaminsäure
4. Serin
5. Glycin
6. Asparagin
7. Threonin
8. Alanin
9. Glutamin
10. β -Alanin
12. Lysin
13. Arginin
14. Methioninsulfoxid
15. Prolin
16. Valin
18. Leucin
19. Tryptophan
20. Histidin
21. Phenylalanin
22. Tyrosin
23. γ -Aminobuttersäure
24. Hydroxy-Prolin
28. Methionin
29. Unbekannte AS
30. " "
157. " "
- U₁ " "
- U₆ " "
- U " " (über 30)
- U " " (unter Prolin)
- U " " (unter Threonin)

IES. Indol-Essigsäure

Nr. 6, 15, 22 und 24 werden mit Ninhydrin braun und die übrigen blau gefärbt.

Die letzten drei unbekannten AS sind in den eigenen Untersuchungen vorgekommen.

MODELL EINES CHROMATOGRAMMES



BUTANOL / EISSESSIG / WASSER-RICHTUNG

PHENOL - RICHTUNG

der in Reagenzgläser überführten Papierschnitzel mit 10 ml 50%igem Äthanol, photometrisch (die durch Ninhydrin blau gefärbten AS bei 570 mμ und die braun gefärbten AS bei 340 mμ) gegen 50%igen Äthanol gemessen. Mit Hilfe von Blindwertmessungen wurde die Eigenextinktion des Papierses ermittelt.

Aus den erhaltenen Extinktionen wurde mit Hilfe eines Standardwertes, der aus dem Verlauf der Eichkurve für jede AS berechnet wurde, die Konzentration der auf dem Chromatogramm gefundenen AS berechnet. Beim Auftreten von unbekannten AS wurden mit Ninhydrin blau gefärbte auf Serin, und braun gefärbte auf Prolin bezogen.

1.2. Die Bestimmung des in Alkohol unlöslichen N.

Die mit absolutem Äthanol extrahierten Pflanzenteile wurden im Trockenschrank bei 105°C getrocknet, anschließend gewogen und mit einer Mühle gemahlen. Die Bestimmung des Gehaltes an gesamtem unlöslichem N erfolgte mit der Halbmikro-Kjeldahl-Methode.

Bei der analytischen Aufarbeitung des Pflanzenmaterials ergaben sich einige Besonderheiten. So führte die Trennung der alkohol-löslichen Aminosäuren von dem gleichzeitig extrahierten Chlorophyll und den fettartigen Bestandteilen der Pflanze durch das Zweiphasensystem (Wasser und Chloroform) zu folgenden Beobachtungen:

- a) Die Intensität der Trübung der schon beschriebenen lipoidartigen Zwischenphase wurde mit Erhöhung der Fe-Konzentration der Nährlösung bzw. mit fortschreitendem Wachstum der mit dieser Fe-Konzentration ernährten Maispflanzen verstärkt. In den Extrakten der mit höheren Fe-Konzentrationen ernährten Pflanzen nahm die Trübung dieser Zwischenphase wieder ab.
- b) Nach der Auflösung des Chlorophylls im Chloroform erhielt die wässrige Phase eine rötlichbräunliche Färbung, die durch mit Äthanol aus den Pflanzen extrahierte rötliche Pigmente (wie Anthozyan) bedingt war. Eine positive Relation bestand zwischen der Intensität der Rotfärbung und der Fe-Konzentration in der Nährlösung bzw. der Fe-Aufnahme durch die Maispflanzen. Bei den höchsten Fe-Konzentrationen nahm jedoch die Intensität der Rotfärbung wieder ab. Sie war aber noch

Abb. 31
Normales Chromatogramm

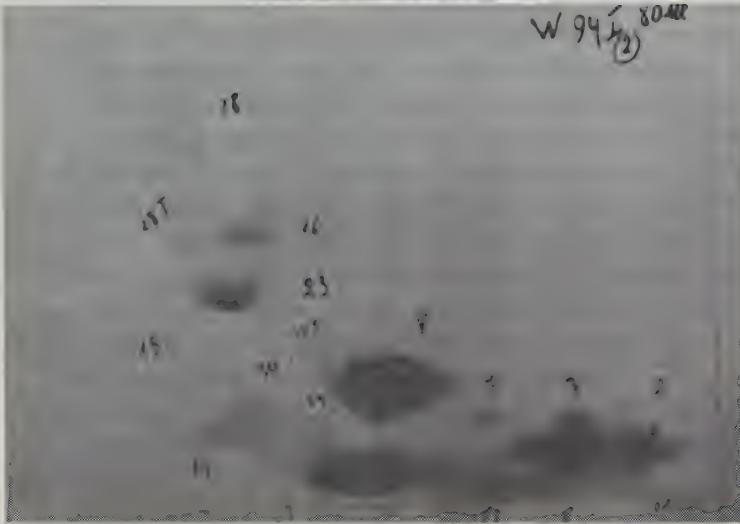


Abb. 32
Durch Störsubstanzen verschmiertes Chromatogramm



deutlicher als bei den Eisenmangel-Pflanzen. Die Rotfärbung der Extrakte stimmte teilweise mit den an den Pflanzen zu beobachtenden Verfärbungen überein.

- c) Eine weitere wichtige Beobachtung wurde nach der Entwicklung bzw. Anfärbung der Chromatogramme zur AS-Bestimmung bei der zweiten Ernte getroffen. Hierbei wurden die AS-Spots einiger Chromatogramme durch gelbliche und manchmal bräunliche, mit Äthanol extrahierbare, in Chloroform unlösliche und von den Dowex-Kationenaustauscher-Säulen mit den zu bestimmenden Aminosäuren festgehaltene unbekannte Störsubstanzen verschmiert (Abb. 32), wodurch die Identifizierung der AS-Spots und ihre quantitative Bestimmung unmöglich wurde. Diese Störsubstanzen traten in den oberirdischen Teilen und zum Teil auch in den Wurzeln des Versuchsgliedes 0,2 ppm Fe auf und zum Teil in den Pflanzen der Versuchsglieder 6,4 und 25,6 ppm Fe.

2. Versuchsergebnisse.

Durch die Steigerung der Eisenkonzentration der Nährlösung konnten Zusammenhänge zwischen Eisenversorgung (Mangel, Normalversorgung und Toxizität) und Proteinsynthese deutlich gemacht werden (Tab. 39 und 44).

2.1. Aus den Untersuchungen der ersten Ernte ist zu ersehen:

- a) Die oberirdischen Teile der Eisenmangelpflanzen (bei 0,2 ppm Fe) enthielten die höchsten Konzentrationen an löslichen Aminosäuren (Tab. 39). Auch die Wurzeln in dieser Eisenstufe enthielten einen hohen Gehalt an löslichen AS, wurden aber von den Wurzeln der Eisenstufe 6,4 ppm Fe übertroffen.

Die papierchromatographisch bestimmten freien Aminosäuren und Amide wurden in Gruppen geordnet. Tabelle 40 zeigt den Einfluß steigender Fe-Konzentrationen in der Nährlösung auf den Gehalt der oberirdischen Pflanzenteile an löslichen AS. Die meisten AS werden in löslicher Form und in hohen Konzentrationen in den Eisenmangelpflanzen (oberirdische Teile bei 0,2 ppm Fe) angetroffen. Weiterhin enthielten diese Pflanzen beachtlich hohe Gehalte an lösli-

chem Alanin, Arginin, Asparaginsäure und Serin. Die Pflanzen der Eisenstufe 6,4 ppm Fe besaßen dagegen höhere Konzentrationen an löslichem Arginin, Alanin und Glutamin. Die prozentualen Anteile der einzelnen freien AS in den oberirdischen Teilen der ersten Ernte sind in Tabelle 41 angegeben. Der höchste Entzug an unlöslichem N war in den Pflanzen des höchsten Ertrages (in dieser Ernte bei der Eisenstufe 25,6 ppm Fe) zu finden (Tab. 39). Der Gehalt an unlöslichem N (unlösl. N/g Fr. Sub.) lag dagegen bei den ohne Eisen und mit überschüssigem Eisen ernährten Pflanzen höher als im Vergleich zu den Fe-Mangel- und optimal gewachsenen Pflanzen.

- b) Die Pflanzenwurzeln dieser Ernte enthielten sehr hohe Konzentrationen an löslichem N bei den Eisenstufen 0,2 (Eisenmangelpflanzen) und 6,4 ppm Fe (optimal gewachsene Pflanzen, Tab. 39). Die Bestimmung der löslichen AS ergab höhere Gehalte an Alanin und γ -Aminobuttersäure in den Wurzeln der ohne Eisen ernährten Pflanzen; Asparaginsäure, Alanin, Arginin, Serin und Glutamin waren bei den Eisenstufen 0,2; 6,4 und 25,6 ppm Fe erhöht und Alanin und Asparaginsäure bei der Eisenstufe 204,8 ppm Fe (Tab. 42). Tabelle 43 zeigt die prozentualen Anteile der freien AS am gesamten löslichen Stickstoff in den Wurzeln der ersten Ernte.

Ein höherer Gehalt an unlöslichem N wurde in den Wurzeln der Eisenmangelpflanzen (0,2 ppm Fe) ermittelt. Die weitere Steigerung der Eisenkonzentration setzte den Gehalt an unlöslichem N in den Wurzeln herab (Tab. 39).

2.2. Die Untersuchung der zweiten Ernte:

- a) Im allgemeinen enthielten die oberirdischen Teile der Maispflanzen bei der zweiten Ernte höhere Gehalte an gesamtem löslichem N im Vergleich zur ersten Ernte (Tab. 44). Die ohne bzw. mit überschüssigem Eisen ernährten Pflanzen enthielten einen höheren Gehalt an löslichem N im Vergleich zu den optimal gewachsenen Pflanzen.

Die Pflanzen der Fe-Mangelreihe (0 ppm Fe) enthielten höhere Konzentrationen an freiem Alanin, Asparaginsäure,

Glycin, Serin, Leucin, Valin und Asparagin (Tab. 45). Im allgemeinen nahmen die Gehalte an freien AS in den oberirdischen Teilen der Pflanzen des höchsten Ertrages (6,4 ppm Fe) beachtlich ab. Bei ihnen lagen die höchsten Werte bei Leucin, Alanin, γ -Aminobuttersäure und Glutamin. Andererseits nahmen die Gehalte an manchen freien AS, wie Arginin, Alanin und Glutamin bei der Eisenstufe 25,6 ppm Fe und Alanin, Asparaginsäure, Arginin, Serin und Glutamin bei der Eisenstufe 204,8 stark zu. Weiterhin setzte die steigende Eisenzufuhr den Gehalt an manchen freien AS, wie Asparagin, herab. Die Gehalte an freien AS nahmen mit steigender Eisenzufuhr bis zur Eisenstufe 6,4 ppm Fe stark ab, danach stiegen sie mit weiterer Erhöhung der Fe-Konzentration in der Nährlösung wieder an. Die ohne Fe ernährten Maispflanzen besaßen jedoch höhere Gehalte an freien AS, als die mit überschüssigem Fe ernährten Pflanzen. Die prozentualen Anteile der freien AS am gesamten löslichen N sind in Tabelle 46 angegeben. Die Bestimmung des unlöslichen N ergab, daß die Pflanzen (oberirdische Teile) des höchsten Ertrages (bei 6,4 ppm Fe) zwar den höchsten Entzug an unlöslichem N besaßen (Tab. 44), daß sie jedoch einen niedrigen Gehalt an unlöslichem N (unlösli. N/g Fr. Sub.) aufwiesen.

- b) Die Untersuchung der Pflanzenwurzeln dieser Ernte (Tab. 44) ergab für die Wurzeln der Eisenmangelpflanzen (bei 0,2 ppm Fe- nur eine biologische Parallele) den höchsten Entzug an löslichem N. Die Gehalte der Wurzeln an unlöslichem N nahmen bis zur Eisenstufe 6,4 ppm Fe ab und mit weiterer Erhöhung der Eisenkonzentration der Nährlösung bis 204,8 ppm Fe wieder zu.

Die Bestimmung der einzelnen freien AS (Tab. 47 und 48) ergab größere Mengen an Asparaginsäure, Alanin und Asparagin in den Wurzeln der ohne Eisen ernährten Pflanzen. Die Wurzeln der Fe-Mangel-Pflanzen (0,2 ppm Fe) wiesen den höchsten Entzug an unlöslichem N auf und auch beachtlich höhere Konzentrationen an den einzelnen freien AS. Im allgemeinen wurden die Gehalte der löslichen AS durch die Erhöhung der Eisenkonzentration bis zur Eisenstufe 25,6 ppm Fe herabgesetzt,

danach stiegen sie wieder an. In den Wurzeln dieser Ernte wurden relativ hohe Mengen an unlöslichem N bei den Eisenstufen 0,2; 6,4 und 25,6 ppm Fe ermittelt. Andererseits besaßen die Pflanzenwurzeln des höchsten Ertrages (bei 6,4 ppm Fe) den niedrigsten Gehalt an unlöslichem N (unlös. N/g Fr. Sub., Tab. 44).

3. Diskussion der Untersuchungen des Proteinstoffwechsels.

Zur Erklärung einiger Zusammenhänge zwischen Eisenernährung und Proteinstoffwechsel wurde im Sommer 1966 ein Wasserkulturversuch mit Mais durchgeführt. Der Versuch dauerte 36 Tage (gerechnet vom Tag des Umpflanzens). Die Ernte der Versuchspflanzen erfolgte zu zwei Terminen, die erste Ernte nach 17 Tagen und die zweite am Ende des Versuches.

Die Maispflanzen zeigten auch in diesem Versuch die Wirkung des Eisens auf das Frisch-, bzw. Trockengewicht. Dieses stieg mit der Erhöhung der Eisenzufuhr bis zum optimalen Bereich an, danach setzte die toxisch wirkende weitere Erhöhung der Eisenkonzentration es wieder herab (Tab. 39 und 44).

Es ist bekannt, daß Protein ein wichtiger Bestandteil jeder Zelle ist. Zahlreiche Lebensfunktionen in der Zelle sind an spezifische Proteine geknüpft, sodaß wir kein Leben ohne Proteine kennen. Ein Einfluß des Proteingehaltes der Zellen auf die Masse dieser Zellen bzw. auf das Gewicht der Pflanzengewebe wird nicht bestritten. Der in den eigenen Untersuchungen und in den Untersuchungen anderer Autoren gefundene Einfluß des Eisens auf das Frisch-, bzw. Trockengewicht der Pflanzen, ist eine bedeutende Beziehung zwischen der Eisenernährung und dem Proteinstoffwechsel der Pflanze. Die Bestimmung der freien (alkohollöslich) Aminosäuren und die Bestimmung des gesamten im Alkohol unlöslichen N sollte die Zusammenhänge zwischen Eisenversorgung und Proteinsynthese in Maispflanzen erklären.

Die Bestimmung der freien AS ergab, daß bei 0,2 ppm Fe die oberirdischen Teile der Eisenmangelpflanzen der ersten Ernte den höchsten Entzug an löslichem N des gesamten Versuches besaßen (Tab. 39). Unter Eisenmangelverhältnissen haben die

Pflanzen den größten Teil des aufgenommenen N zur Synthese löslicher AS verwendet, aber nicht zur Proteinsynthese. Die weitere Erhöhung der Fe-Konzentration der Nährlösung über 0,2 ppm Fe setzte wegen der erhöhten Proteinbildung den Entzug bzw. den Gehalt an löslichem N herab. Bei den ohne Eisen ernährten Pflanzen (oberirdische Teile) reichte der Eisenvorrat des Kornes für weiteres Wachstum bzw. die AS-Synthese nicht aus. Aber auch die schädliche Wirkung der überschüssigen Eisenernährung durch Störung der Chlorophyllsynthese verursachte eine allgemeine Abnahme in der AS-Bildung.

Die Untersuchungen der Pflanzenwurzeln der ersten Ernte ergaben die größte Menge an löslichem N in den Wurzeln der beiden Eisenstufen 6,4 und 0,2 ppm Fe. Wie in den oberirdischen Teilen sank der Entzug bzw. der Gehalt an löslichem N bei höheren Eisengaben ab.

Der relativ hohe Gehalt der oberirdischen Teile der Eisenmangelpflanzen an löslichem N wurde bei der zweiten Ernte nicht bestätigt (Tab. 44). Dies mag die widersprüchlichen Meinungen mancher Autoren in Bezug auf den Gehalt der Eisenmangelpflanzen an löslichem N erklären. Offenbar verändert sich dieser Gehalt bei der gleichen Eisenstufe während der Vegetationsperiode. Hiermit in Zusammenhang stehen kann die Entstehung der Störsubstanzen in den Eisenmangelpflanzen bei 0,2 ppm Fe und in einer biologischen Parallele der beiden Eisenstufen 6,4 und 25,6 ppm Fe der zweiten Ernte.

Die oberirdischen Teile der ohne Fe ernährten Pflanzen enthielten in der zweiten Ernte (älter und schwerer im Gewicht als in der ersten Ernte) einen wesentlich höheren Gehalt an löslichem N, als in der ersten Ernte. Die Zunahme des Gehaltes an löslichem N kann auf den Abbau des in diesen Pflanzenteilen vorhandenen Proteins in seine Baustoffe bzw. zu löslichen Aminosäuren zurückgeführt werden. Andererseits kann der niedrige Gehalt der optimal gewachsenen Pflanzen (bei 6,4 ppm Fe) an löslichem N auf die aktive Proteinbildung in diesen Pflanzen bei optimaler Eisenernährung zurückgeführt werden. Höhere Gehalte an löslichen AS wurden in den oberirdischen Teilen der mit überschüssigem Eisen ernährten Pflanzen der zweiten Ernte ermittelt. In diesem

Fall wird die toxische Wirkung des im Überschuß aufgenommenen Eisens die Proteinsynthese bzw. die physiologischen Funktionen anderer Elemente wie Mn und P und von Enzymen, die die Proteinsynthese beschleunigen, hemmen. Der Gehalt an freien AS wird so durch die gehemmte Proteinsynthese erhöht. Darüber hinaus wird das Chlorophyll der mit überschüssigem Eisen ernährten Pflanzen abgebaut, was ebenfalls zur Erhöhung des Gehaltes an freien AS führen kann.

Die Wurzeln der zweiten Ernte besaßen den höchsten Gehalt an löslichem N bei den Eisenmangelpflanzen mit 0,2 ppm Fe, ebenso wie bei der ersten Ernte.

Tabelle 40 zeigt den Einfluß der steigenden Eisernährung auf die Zusammensetzung der alkohollöslichen N-Fraktion in den oberirdischen Teilen der ersten Ernte. Der größte AS-Anteil (25,6%) der ohne Eisen ernährten Pflanzen bestand aus freiem Alanin (neutrale AS und Baustein anderer AS). Weiterhin waren die Konzentrationen an Glycin (die einfachste AS), Asparagin und Glutamin (Amide), Serin (hydroxy-AS) und γ -Aminobuttersäure (neutrale AS) ebenfalls relativ hoch. Die absolute Menge der freien AS war aber gering, als Beweis für die bedeutende Rolle des Eisens zur Aktivierung der AS-Synthese. Andererseits enthielten die gleichen Pflanzen, aber in der zweiten Ernte (Tab. 45), beachtlich höhere Gehalte an den meisten freien AS, trotz der geringen Zunahme im Gewicht dieser Pflanzen. Der Abbau des vorhandenen Proteins in diesen Pflanzen zu freien AS geschieht eher und häufiger als die Bildung neuen Proteins, was die Konzentration der freien AS erhöht. In diesen Pflanzen der zweiten Ernte war die absolute Menge und der Gehalt an löslichem N (Tab. 45) höher als in den gleichen Pflanzen der ersten Ernte (Tab. 40). In der zweiten Ernte enthielten diese Pflanzen besonders hohe Gehalte an Alanin und Asparagin (27,2% und 24,4% des gesamten löslichen N) (Tab. 46). Aber auch die meisten anderen normalerweise vorkommenden AS waren in diesen Pflanzen in größeren Mengen vorhanden.

Die oberirdischen Teile der Eisenmangelpflanzen (0,2 ppm Fe) der ersten Ernte, die den höchsten Gehalt an löslichem N besaßen, enthielten sehr große Mengen an freiem Alanin (31% des ge-

samen löslichen N). Darüber hinaus wurden in diesen Pflanzen höhere Konzentrationen an freiem Arginin (basische AS), Asparaginsäure (saure AS) und Serin ermittelt. HOLLEY und CAIN (1955) und PERUR und Mitarbeiter (1961) stellten ebenfalls hohe Konzentrationen an freiem Arginin und Asparaginsäure in den chlorotischen Blättern fest. Trotzdem kann nicht behauptet werden, daß die Eisenmangelpflanzen in allen Entwicklungsstadien hohe Konzentrationen an den freien AS enthalten. Denn durch die Bildung der Störsubstanzen in diesen Pflanzen der zweiten Ernte, welche die Bestimmung der löslichen AS verhinderte, konnte eine Veränderung der Zusammensetzung der löslichen N-Fraktion nicht verfolgt werden.

Die Pflanzen (oberirdische Teile) der Eisenstufe 6,4 ppm Fe der ersten Ernte enthielten den größten Anteil (27,2%) des gesamten löslichen N als freies Arginin. Weiterhin wurden hohe Konzentrationen an freiem Alanin und Glutamin in diesen Pflanzenteilen ermittelt. Im allgemeinen setzte die steigende Eisenernährung ab der Eisenstufe 0,2 ppm Fe den Gehalt an löslichen AS in den oberirdischen Teilen der ersten Ernte herab. Diese Abnahme kann bei den beiden Eisenstufen 6,4 und 25,6 ppm Fe auf die Umwandlung der löslichen AS zu Protein und bei der Eisenstufe 204,8 ppm Fe auf die toxische Wirkung des im Überschuß aufgenommenen Eisens zurückgeführt werden. Die Pflanzen des Höchstsertrages der zweiten Ernte (6,4 ppm Fe) besaßen den niedrigsten Gehalt an löslichen AS wegen der ungestörten Bildung unlöslicher N-Verbindungen, bzw. des Proteins (Tab. 45). Wichtig an dieser Stelle zu erwähnen ist, daß das freie Arginin in diesen Pflanzen völlig verschwand; in den gleichen Pflanzen der ersten Ernte jedoch machte das Arginin den größten Anteil des löslichen N aus. Die oberirdischen Teile der Eisenstufe 25,6 ppm Fe der zweiten Ernte besaßen erstaunlich hohe Gehalte an freiem Arginin, Asparaginsäure und Glutamin. In diesen Pflanzen wurden ebenfalls eine große Menge an freiem Alanin ermittelt. Hierbei erfolgte eine Abnahme im Frisch- und Trockengewicht dieser Pflanzen durch die ab dieser Eisenstufe ersichtliche toxische Wirkung der überschüssigen Eisenernährung, die zur Hemmung der Proteinsynthese bzw. zur Erhöhung des Gehaltes

an freien AS führte. Die oberirdischen Teile der Eisenstufe 204,8 ppm Fe der zweiten Ernte, bei der die Toxizität des Eisens eine große Rolle spielte, enthielten die höchste Konzentration an freiem Alanin, die überhaupt bei sämtlichen eigenen Untersuchungen ermittelt wurde. Auch die Konzentrationen der freien Asparaginsäure und des Glutamins waren in diesen Pflanzen hoch. In den ohne Eisen ernährten Pflanzen wiesen, ebenso wie bei den oberirdischen Teilen, auch die Wurzeln einen sehr hohen Anteil an freiem Alanin auf. In den gleichen Wurzeln der zweiten Ernte war die Konzentration an freiem AS wesentlich höher, speziell in Hinblick auf Asparagin und Alanin, als bei der ersten Ernte.

Die Wurzeln der Eisenmangelpflanzen (0,2 ppm Fe) der ersten Ernte, enthielten größere Mengen an löslicher Asparaginsäure, Alanin, Arginin und Glutamin. Bei der zweiten Ernte besaßen die Wurzeln ebenfalls höhere Gehalte und höhere Konzentrationen an den letztgenannten freien AS.

Bei der Eisenstufe 6,4 ppm Fe machten Asparaginsäure, Arginin, Alanin und Glutamin den größten Anteil in den Wurzeln beider Ernten aus. Die Wurzeln der Eisenstufe 25,6 ppm Fe ergaben in den beiden Ernten höhere Werte an löslicher Asparaginsäure, Alanin, γ -Aminobuttersäure (nur in der zweiten Ernte) und Glutamin. Bei toxischer Eisenversorgung (204,8 ppm Fe) enthielten die Wurzeln hohe Gehalte an löslicher Asparaginsäure und Alanin in der ersten Ernte; Alanin, Asparaginsäure und Asparagin in der zweiten Ernte.

Insgesamt ergab die Bestimmung des unlöslichen N in den Maispflanzen, daß sowie Eisenmangel als auch überschüssige Eisenernährung den Gehalt an unlöslichem N bzw. Protein-N herabsetzten (Tab. 39 und 44). Die oberirdischen Teile der ersten Ernte enthielten relativ hohe Konzentrationen an löslichem N bei relativ geringem Gehalt an Protein-N. Die oberirdischen Teile der Eisenstufe 25,6 ppm Fe (höchster Ertrag) der ersten Ernte besaßen den höchsten Gehalt an unlöslichem N, bei niedrigem Gehalt an löslichem N. Auch in der zweiten Ernte enthielten die Pflanzen des höchsten Ertrages den höchsten Gehalt an unlöslichem N, mit ebenfalls niedrigem Gehalt an löslichem N. Die Wurzeln der

Eisenstufen 0,2; 6,4 und 25,6 ppm Fe wiesen die höchsten Gehalte an unlöslichem N in beiden Ernten auf. Tabelle 49 stellt die prozentualen Anteile des löslichen und unlöslichen N am gesamten N der Pflanzen (immer 2 Pflanzen) in beiden Ernten dar.

Tab. 39

Frisch-und Trockenertrag von 2 Pflanzen.
Gehalte der Frisch-Substanz an alkohollöslichem und
alkoholunlöslichem N bei der ersten Ernte.

ppm Fe der Nähr- lö- sung	Oberirdische Teile				Wurzeln			
	Frisch- Gew. g	Trocken- Gewicht g	lösli- ch N/g Fr.- Substanz	mg un- lösli- ch N/ g Fr.- Subst.	Frisch- Gew. g	Trocken- Gewicht g	lösli- ch N/g Fr.- Substanz	mg un- lösli- ch N/ g Fr.- Subst.
0	1,7	0,102	83,09	5,4	3,9	0,143	58,21	1,05
0,2	16,0	0,926	136,45	1,9	14,5	0,519	137,78	1,5
6,4	19,7	1,223	68,46	2,5	12,6	0,523	169,87	0,8
25,6	20,7	1,231	15,73	2,9	13,9	0,514	106,69	0,7
204,8	8,0	0,564	10,20	3,2	5,9	0,292	56,44	0,7

Tab. 40

Erste Ernte. μg lösl. AS-N/g Fr.-Subst (Oberirdische Teile).

AS Gruppe	Aminosäuren	ppm Fe der Nährlösung				
		0	0,2	6,4	25,6	204,8
Glutamin-säure Gruppe	Glutamins.	1,94	4,31	0,86	0,72	0,40
	Glutamin	7,05	6,63	12,79	1,47	1,57
	γ -Aminobutters.	6,94	6,15	2,32	0,73	1,23
	Prolin	1,53	1,02	-	-	-
	Arginin	-	20,89	18,66	1,97	1,08
	Summe	17,46	39,00	34,63	4,89	4,28
Asparaginsäure Gruppe	Asparagins.	Sp.	14,08	2,86	0,87	Sp.
	Asparagin	10,23	6,97	-	-	-
	Methionin	Sp.	Sp.	-	-	-
	Methioninsulfoxid	-	0,45	1,41	-	Sp.
	Threonin	4,53	2,54	0,80	0,45	-
	Lysin	4,70	4,47	3,36	2,31	2,14
	Summe	19,46	28,51	8,43	3,63	2,14
Serin Gruppe	Serin	8,23	13,65	4,90	1,27	0,35
	Glycin	12,35	5,19	3,74	1,21	1,38
	Summe	20,58	18,84	8,64	2,48	1,73
Brenztraubens. Gruppe	Alanin	21,30	43,45	13,66	2,62	1,24
	Valin	3,70	3,34	0,64	0,28	0,55
	Leucin	0,59	2,78	0,29	0,57	-
	Summe	25,59	49,57	14,59	3,47	1,79
	β -Alanin	-	0,13	-	-	-
	Tryptophan	-	-	-	-	-
	Histidin	-	-	-	-	-
	Tyrosin	-	0,19	-	-	-
	29	-	0,21	0,47	0,32	Sp.
	30	-	-	0,80	0,21	Sp.
	157	-	Sp.	0,40	0,25	-
	U ₁	-	Sp.	-	0,13	0,26
	U ₆	-	-	-	-	-
	U ₆ über 30	-	-	0,50	0,48	-
	U unter Prolin	-	Sp.	-	-	-
	IES	-	-	vorhanden	vorhanden	-
	Summe	-	0,53	2,17	1,39	0,26
	Gesamt	83,09	136,45	68,46	15,86	10,20

Tab. 41

Erste Ernte.

Prozentuale Anteile der einzelnen löslichen AS
am Gesamt AS-N in den oberirdischen Teilen.

		ppm Fe der Nährlösung				
AS Gruppe	Aminosäuren	0	0,2	6,4	25,6	204,8
Glutamin-säure Gruppe	Glutamins.	2,3	3,1	1,2	4,7	3,9
	Glutamin	8,4	4,8	18,7	9,5	15,5
	γ -Aminobutters.	8,3	4,6	3,3	4,7	12,1
	Prolin	1,8	0,7	-	-	-
	Arginin	-	15,3	27,2	12,7	10,5
	Summe	20,8	28,5	50,4	31,6	42,0
Asparaginsäure Gruppe	Asparagins.	Sp.	10,3	4,1	5,6	Sp.
	Asparagin	12,3	5,1	-	-	-
	Methionin	Sp.	Sp.	-	-	-
	Methioninsulfoxid	-	0,3	2,1	-	Sp.
	Threonin	5,4	1,8	1,2	2,9	-
	Lysin	5,6	3,2	4,9	14,9	21,0
	Summe	23,3	20,7	12,3	23,4	21,0
Serin Gruppe	Serin	9,9	10,0	7,1	8,2	3,4
	Glycin	14,9	3,8	5,4	7,9	13,5
	Summe	24,8	13,8	12,5	16,1	16,9
Brenztraubens. Gruppe	Alanin	25,6	31,8	19,9	17,0	12,1
	Valin	4,5	2,4	0,9	1,8	5,4
	Leucin	0,8	2,0	0,4	3,6	-
	Summe	30,9	36,2	21,2	22,4	17,5
	β -Alanin	-	0,1	-	-	-
	Tryptophan	-	-	-	-	-
	Histidin	-	-	-	-	-
	Tyrosin	-	0,1	-	-	-
	29	-	0,1	-	2,1	Sp.
	30	-	-	1,2	1,3	Sp.
	157	-	Sp.	0,5	1,5	-
	U ₁	-	Sp.	-	0,8	2,6
	U ₆	-	-	-	-	-
	U über 30	-	-	0,7	0,3	-
	U unter Prolin	-	Sp.	-	-	-
	IES	-	-	vorhanden	vorhanden	-
	Summe	-	0,3	3,0	6,0	2,6
	μ g lösl.N in 2 Pflanzen	141,2	2183,8	1349,8	319,5	81,5

Tab. 42

Erste Ernte.

µg lösl. AS-N/g Fr.-Subst (Wurzeln).

		ppm Fe der Nährlösung				
AS Gruppe	Aminosäuren	0	0,2	6,4	25,6	204,8
Glutamin-säure Gruppe	Glutamins.	1,60	3,68	2,50	3,12	3,49
	Glutamin	2,02	16,73	41,95	14,94	2,59
	γ-Aminobutters.	7,64	5,20	4,84	3,34	4,16
	Prolin	1,97	0,70	1,44	0,62	-
	Arginin	Sp.	12,09	19,61	13,15	-
	Summe	13,23	38,40	70,34	35,17	10,24
Asparaginsäure Gruppe	Asparagins.	Sp.	34,33	24,88	27,53	10,84
	Asparagin	3,43	5,18	2,51	3,27	5,74
	Methionin	Sp.	Sp.	Sp.	Sp.	-
	Methioninsulfoxid	-	2,65	5,50	1,87	-
	Threonin	2,07	1,83	1,48	1,25	1,84
	Lysin	Sp.	3,45	4,19	4,70	4,47
	Summe	5,50	47,44	38,56	38,62	22,89
Serin Gruppe	Serin	3,07	9,97	9,02	6,02	3,86
	Glycin	6,10	4,11	3,88	3,12	4,57
	Summe	9,17	14,08	12,90	9,14	8,43
Brenztraubens. Gruppe	Alanin	23,94	33,63	42,29	19,56	11,44
	Valin	3,51	1,75	1,84	1,23	1,59
	Leucin	2,48	1,01	1,07	0,60	1,05
	Summe	29,93	36,39	45,20	21,39	14,08
	β-Alanin	-	-	-	-	-
	Tryptophan	-	-	-	-	-
	Histidin	-	-	0,52	0,65	-
	Tyrosin	-	-	-	-	-
	29	-	0,55	0,78	0,66	0,57
	30	-	0,47	0,98	0,52	-
	157	0,38	0,45	0,73	0,53	0,23
	U ₁	-	-	-	-	-
	U ₆	-	-	-	-	-
	U über 30	-	-	-	-	-
	U unter Prolin	-	-	-	-	-
	IES	-	vorhanden vorhanden vorhanden vorhanden			
	Summe	0,38	1,47	3,01	2,36	0,80
	Gesamt	58,21	137,78	170,01	106,68	56,44

Tab. 43

Erste Ernte.

Prozentuale Anteile der einzelnen löslichen
AS am Gesamt AS-N in den Wurzeln.

		ppm Fe der Nährlösung				
AS Gruppe	Aminosäuren	0	0,2	6,4	25,6	204,8
Glutamin säure Gruppe	Glutamins.	2,8	2,7	1,5	2,9	6,2
	Glutamin	3,5	12,1	24,7	14,0	4,6
	γ -Aminobutters.	13,1	3,8	2,8	3,1	7,4
	Prolin	3,3	0,5	0,8	0,6	-
	Arginin	Sp.	8,8	11,5	12,3	-
	Summe	22,7	27,9	41,3	32,9	18,2
Asparagin- säure Gruppe	Asparagins.	Sp.	24,9	14,6	25,8	19,2
	Asparagin	5,9	3,8	1,5	3,1	10,2
	Methionin	Sp.	Sp.	Sp.	Sp.	-
	Methioninsulfoxid	-	1,9	3,2	1,8	-
	Threonin	3,5	1,3	0,9	1,2	3,3
	Lysin	Sp.	2,5	2,5	4,3	7,9
	Summe	9,5	34,4	22,7	36,2	40,6
Serin Gruppe	Serin	5,3	7,2	5,3	5,6	6,8
	Glycin	10,5	2,9	2,3	2,9	8,1
	Summe	15,8	10,1	7,6	8,5	14,9
Brenztraubens- Gruppe	Alanin	41,0	24,4	24,9	18,3	20,3
	Valin	6,0	1,3	1,1	1,2	2,8
	Leucin	4,2	0,7	0,6	0,6	1,9
	Summe	51,2	26,4	26,6	20,1	25,0
	β -Alanin	-	-	-	-	-
	Tryptophan	-	-	-	-	-
	Histidin	-	-	0,3	0,6	-
	Tyrosin	-	-	-	-	-
	29	-	0,4	0,5	0,6	1,0
	30	-	0,3	0,6	0,5	-
	157	0,6	0,3	0,4	0,5	0,4
	U ¹	-	-	-	-	-
	U ⁶	-	-	-	-	-
	über 30	-	-	-	-	-
	unter Prolin	-	-	-	-	-
	IES	-	vorhanden	vorhanden	vorhanden	vorhanden
	Summe	0,6	1,0	1,8	2,2	1,4
	μ g lösl.N in 2 Pflanzen	227,4	1999,0	2143,4	1484,2	333,3

Tab. 44

Frisch-und Trockenertrag von 2 Pflanzen.
Gehalte der Frisch-Substanz an alkohollöslichem und
alkoholunlöslichem N bei der zweiten Ernte.

ppm Fe der Nähr- lö- sung	Oberirdische Teile				Wurzeln			
	Frisch- Gew. g	Trocken- Gewicht g	lösli- che N/ g Fr.- Substanz	mg un- lösli- che N/ g Fr.- Subst.	Frisch- Gew. g	Trocken- Gewicht g	lösli- che N/ g Fr.- Substanz	mg un- lösli- che N/ g Fr.- Subst.
0	4,2	0,658	575,88	6,5	7,2	0,392	98,45	1,7
0,2	45,4	2,877	Störsub- stanzen	2,1	34,3	1,371	166,61	1,5
6,4	111,0	8,459	8,97	1,9	46,0	2,834	76,74	1,1
25,6	103,0	8,552	49,23	1,68	40,0	2,432	33,10	1,47
204,8	31,5	2,546	133,09	2,9	13,0	0,612	90,74	1,6

Tab. 45

Zweite Ernte. μg lösl. AS-N/g Fr.-Subst (Oberirdische Teile).

AS Gruppe	Aminosäuren	ppm Fe der Nährlösung				
		0	0,2	6,4	25,6	204,8
Gluta- min- säure Gruppe	Glutamins.	7,42		0,37	0,24	1,71
	Glutamin	17,45		0,95	9,84	16,52
	γ -Amino- butters.	22,85		1,24	1,55	3,52
	Prolin	2,54		-	-	0,56
	Arginin	4,45		-	11,52	13,30
	Summe	54,71		2,56	23,15	35,61
As- para- gin- säure Gruppe	Asparagins.	47,19	S T O R S T O R S	Sp.	8,24	25,06
	Asparagin	140,21		-	-	9,36
	Methionin	1,26		-	-	Sp.
	Methionin- sulfoxid	3,73		-	1,36	1,37
	Threonin	8,97		0,35	0,35	1,86
	Lysin	12,16		-	2,72	6,84
	Summe	213,52		0,35	12,67	44,49
Serin Gruppe	Serin	42,45		0,40	1,14	8,63
	Glycin	44,78		0,66	1,61	6,85
	Summe	87,23		1,06	2,75	15,48
Brenz- trau- bens. Gruppe	Alanin	156,28		1,84	6,09	30,37
	Valin	27,14		0,44	1,10	2,62
	Leucin	31,16		1,85	1,41	1,80
	Summe	214,58		4,13	8,60	34,79
	β -Alanin	-		-	-	-
	Tryptophan	-		-	-	-
	Histidin	-		-	0,37	-
	Tyrosin	-		-	-	-
	29	-		0,27	0,44	0,95
	30	0,47		-	0,50	0,78
	157	2,83		0,16	0,19	0,47
	U ₁	0,71		0,13	0,27	0,52
	U ₆	-		0,15	0,29	-
	U ₆ über 30	1,83		-	-	-
	U unter Prolin	-		-	-	-
	U unter Threonin	-		0,16	-	-
	IES	vorhanden		vorhanden	vorhanden	vorhanden
	Summe	5,84		0,87	2,06	2,72
	Gesamt	575,88		8,97	49,23	133,09

Tab. 46

Zweite Ernte.Prozentuale Anteile der einzelnen löslichen AS
am Gesamt AS-N in den oberirdischen Teilen.

		ppm Fe der Nährlösung				
AS Gruppe	Aminosäuren	0	0,2	6,4	25,6	204,8
Glutamin-säure Gruppe	Glutamins.	1,3		4,1	0,5	1,3
	Glutamin	3,0		10,5	20,0	12,4
	γ-Aminosäurebutters.	4,0		13,8	3,2	2,6
	Prolin	0,4		-	-	0,4
	Arginin	0,8		-	23,4	10,0
	Summe	9,5		28,4	47,1	26,7
Asparaginsäure Gruppe	Asparagins.	8,2		Sp.	16,7	18,8
	Asparagin	24,4		-	-	7,0
	Methionin	0,2		-	-	Sp.
	Methioninsulfoxid	0,6		-	2,8	1,0
	Threonin	1,6		3,9	0,7	1,4
	Lysin	2,1		-	5,5	5,1
	Summe	37,1		3,9	25,7	33,3
Serin Gruppe	Serin	7,4		4,5	2,3	6,5
	Glycin	7,8		7,3	3,3	5,1
	Summe	15,2		11,8	5,6	11,6
Brenztraubensäure Gruppe	Alanin	27,2		20,5	12,4	22,8
	Valin	4,7		4,9	2,2	1,9
	Leucin	5,4		20,5	2,9	1,4
	Summe	37,3		45,9	17,5	26,1
STÖRSUBSTANZEN	β-Alanin	-		-	-	-
	Tryptophan	-		-	-	-
	Histidin	-		-	0,8	-
	Tyrosin	-		-	-	-
	29	-		3,1	0,9	0,7
	30	0,1		-	1,0	0,6
	157	0,5		1,8	0,4	0,3
	U ₁	0,1		1,5	0,6	0,4
	U ₆	-		1,7	0,6	-
	über 30	0,3		-	-	-
	unter Prolin	-		-	-	-
	unter Threonin	-		1,8	-	-
	IES	vorhanden		vorhanden	vorhanden	vorhanden
	Summe	1,0		9,9	4,3	2,0
	µg lösl.N in 2 Pflanzen	2412,1		1003,3	5080,6	4195,0

Tab. 47

Zweite Ernte.

µg lösl. AS-N/g Fr.-Subst (Wurzeln).

		ppm Fe der Nährlösung				
AS Gruppe	Aminosäuren	0	0,2	6,4	25,6	204,8
Glutaminsäure Gruppe	Glutamins.	3,43	6,47	0,80	0,54	2,91
	Glutamin	3,27	18,66	10,58	3,15	2,60
	γ-Aminobutters.	6,09	6,79	2,53	3,31	7,06
	Prolin	0,72	2,79	1,25	0,19	0,61
	Arginin	Sp.	13,56	12,37	0,95	-
	Summe	13,51	48,27	27,53	8,14	13,18
Asparaginsäure Gruppe	Asparagins.	16,83	43,02	24,48	6,99	15,30
	Asparagin	22,91	5,89	-	0,66	11,32
	Methionin	0,15	0,46	-	Sp.	-
	Methioninsulfoxid	1,75	3,82	2,68	1,85	0,86
	Threonin	2,38	2,28	1,04	0,56	1,49
	Lysin	4,80	6,86	4,68	0,93	2,73
	Summe	48,82	62,33	32,88	10,99	31,70
Serin Gruppe	Serin	7,20	8,37	2,08	1,89	6,33
	Glycin	5,30	4,69	2,62	1,16	4,98
	Summe	12,50	13,06	4,70	3,05	11,31
Brenztraubens. Gruppe	Alanin	15,95	35,07	4,85	7,35	31,74
	Valin	3,31	2,52	1,16	0,74	1,01
	Leucin	2,98	1,72	1,30	1,00	0,70
	Summe	22,24	39,31	7,31	9,09	33,45
	β-Alanin	-	-	-	-	-
	Tryptophan	-	Sp.	-	0,08	-
	Histidin	-	1,03	2,14	0,74	-
	Tyrosin	-	-	-	-	-
	29	-	0,49	0,60	0,39	0,38
	30	0,41	1,13	1,12	0,30	0,24
	157	0,97	0,99	0,46	0,24	0,48
	U ₁	Sp.	-	-	0,08	-
	U ₆	-	-	-	-	-
	U über 30	-	-	-	-	-
	U unter Prolin	-	-	-	-	-
	U unter Threonin	-	-	-	-	-
	IES	vorhanden vorhanden - vorhanden vorhanden				
	Summe	1,38	3,64	4,32	1,83	1,10
	Gesamt	98,45	166,61	76,74	33,10	90,74

Tab. 48

Zweite Ernte.

Prozentuale Anteile der einzelnen löslichen
AS am Gesamt AS-N in den Wurzeln.

		ppm Fe der Nährlösung				
AS Gruppe	Aminosäuren	0	0,2	6,4	25,6	204,8
Glutaminsäure Gruppe	Glutamins.	3,5	3,9	1,0	1,6	3,2
	Glutamin	3,3	11,2	13,8	9,6	2,9
	γ -Aminobutters.	6,2	4,1	3,3	10,1	7,8
	Prolin	0,9	1,7	1,6	0,6	0,7
	Arginin	Sp.	8,1	16,1	2,9	-
	Summe	13,9	29,0	35,8	24,8	14,6
Asparaginsäure Gruppe	Asparagins.	17,0	25,8	31,9	21,2	16,9
	Asparagin	23,2	3,5	-	2,0	12,5
	Methionin	0,1	0,2	-	Sp.	-
	Methioninsulfoxid	1,8	2,3	3,5	5,6	0,9
	Threonin	2,4	1,4	1,4	1,7	1,6
	Lysin	4,9	4,1	6,1	2,8	3,0
	Summe	49,4	37,3	42,9	33,3	34,9
Serin Gruppe	Serin	7,3	5,0	2,7	5,7	7,0
	Glycin	5,4	2,8	3,4	3,2	5,5
	Summe	12,7	7,8	6,1	8,9	12,5
Brenztraubens. Gruppe	Alanin	16,2	21,0	6,3	22,3	34,9
	Valin	3,4	1,5	1,5	2,2	1,1
	Leucin	3,0	1,0	1,7	3,0	0,8
	Summe	22,6	23,5	9,5	27,5	36,8
	β -Alanin	-	-	-	-	-
	Tryptophan	-	Sp.	-	0,2	-
	Histidin	-	0,6	2,8	1,7	-
	Tyrosin	-	-	-	-	-
	29	-	0,3	0,8	1,2	0,4
	30	0,4	0,7	1,5	0,9	0,3
	157	0,9	0,6	0,6	0,8	0,5
	U ₁	Sp.	-	-	0,2	-
	U ₆	-	-	-	-	-
	über 30	-	-	-	-	-
	unter Prolin	-	-	-	-	-
	unter Threonin	-	-	-	-	-
	IES	vorhanden	vorhanden	-	vorhanden	vorhanden
	Summe	1,3	2,2	5,7	5,0	1,2
	μ g lösl. N in 2 Pflanzen	711,0	5718,1	3533,3	1315,9	1180,8

Tab. 49

Prozentuale Anteile an löslichem und unlöslichem N in oberirdischen Teilen und Wurzeln der Maispflanzen beider Ernten.

	ppm Fe der Nähr- lö- sung	Oberirdische Teile			Wurzeln		
		Gesamt- Entzug durch 2 Pflanzen (mg N)	davon lösl. Anteil in %	davon unlösl. Anteil in %	Gesamt- Entzug durch 2 Pflanzen (mg N)	davon lösl. Anteil in %	davon unlösl. Anteil in %
1. ERNTE	0	9,3	1,6	98,4	4,3	5,3	94,7
	0,2	33,0	6,7	93,3	24,4	8,2	91,8
	6,4	50,9	2,7	97,3	12,6	17,0	83,0
	25,6	61,6	0,6	99,4	11,4	13,1	86,9
	204,8	25,5	0,4	99,6	4,6	7,2	92,8
2. ERNTE	0	29,7	8,2	91,8	13,1	5,5	94,5
	0,2	Störsubstanzen		! !	57,1	10,1	89,9
	6,4	222,0	0,5	99,5	55,8	6,4	93,6
	25,6	178,7	2,9	97,1	60,1	2,2	97,8
	204,8	96,0	4,4	95,6	22,6	5,3	94,7

D Zusammenfassung

Ziel vorliegender Arbeit war, die Auswaschung bzw. Verlagerung sowie die Mineralisierung verschiedener Eisenformen in verschiedenen Böden zu untersuchen. Außerdem sollten der Einfluß steigender Eisenversorgung auf Ertrag, Eisengehalt und Protein-stoffwechsel von Maispflanzen und einige Zusammenhänge in der Eisenaufnahme durch junge Sonnenblumpenpflanzen aufgeklärt werden.

I Die Auswaschung bzw. Verlagerung dreier Eisenformen in vier verschiedenen Böden.

Die Auswaschungsversuche mit verschiedenen markierten Eisenformen auf vier Böden führte zu folgenden Ergebnissen:

1. Obwohl insgesamt nur geringe Mengen von markiertem Eisen zur Auswaschung kamen, bestanden doch deutliche Unterschiede zwischen den einzelnen Eisenformen. Fe-EDTA wurde auf Boden Darmstadt in 10 facher, auf Boden Dachau und Oldenburg sauer in 20 facher und auf Boden Oldenburg neutral in 3 facher Menge ausgewaschen, wie bei den anderen beiden Eisenformen. Diese höhere Auswaschung des Fe-EDTA ist als Beweis für seine länger anhaltende Löslichkeit (hohe Stabilität) im Vergleich zu Fe-Chlorid und Fe-Citrat anzusehen.
2. Auf den beiden Böden Oldenburg sauer und neutral wurden unabhängig von der Eisendüngung erhebliche Mengen an bodeneigenem, nichtmarkiertem Eisen ausgewaschen. Zwischen dieser Auswaschung an bodeneigenem, nichtmarkiertem Eisen und der Düngung mit verschiedenen Eisenformen scheint kein Zusammenhang zu bestehen.
3. Durch Wasserauszüge konnten entweder keine oder nur sehr geringe Anteile der drei Eisensalze in den einzelnen Bodenschichten aller vier Böden nachgewiesen werden.
Die Auszüge mit $n/2$ HCl ergeben ein besseres Bild über die Verteilung des markierten Eisens. Von Eisenchlorid und Eisencitrat wurden bereits in der Bodenoberfläche (3 cm Tiefe) 60-70% in allen Böden festgelegt (mit $n/2$ HCl extrahierbar), außer beim Boden Dachau, wo nur 27% des Eisenchlorids

und 18% des Eisencitrats in der obersten Bodenschicht festgelegt wurden. Nur geringste Anteile dieser beiden Salze wurden auf allen Böden tiefer als 3 cm verlagert.

Ganz anders verhielt sich das Fe-EDTA. Bei allen vier Böden wurde es auf sämtliche Säulenabschnitte verteilt, unter besonderen Bevorzugung des fünften Abschnittes (20-30 cm Tiefe).

Die nachstehende Tabelle zeigt den fixierten (mit $n/2$ HCl nicht extrahierbaren) Anteil der drei Eisensalze in den vier Böden (in %):

Böden	Der fixierte Anteil (in %) von		
	Fe-Chlorid	Fe-EDTA	Fe-Citrat
Darmstadt (kalkhaltig)	33,7	33,7	27,0
Dachau (kalkreich)	72,5	84,7	78,5
Oldenburg (sauer)	36,5	39,4	38,3
Oldenburg (neutral)	36,3	35,8	34,9

Es geht daraus hervor, daß in der Fixierung der verschiedenen Eisenformen keine wesentlichen Unterschiede bestanden.

II Die Mineralisierung vier verschiedener Eisenchelatverbindungen in den gleichen vier Böden.

Die Mineralisierung bzw. Stabilität der mit ^{59}Fe markierten Eisenchelatverbindungen EDTA-Natriumsalz-Eisensalz, Eisen-Natriumsalz der Monooxäthylaminodiessigsäure, Eisen-Natriumsalz der Nitrilotriessigsäure (NTA) und Eisen-Komplexsalz der Diäthanolaminoessigsäure in den vier Böden wurde durch Wasser-, $n/2$ HCl- und Doppellaktat-Auszüge untersucht.

1. Die Verbindung EDTA-Natriumsalz-Eisensalz zeigte bei allen Extraktionsarten eine länger anhaltende Löslichkeit bzw.

- eine größere Stabilität, speziell im sauren Boden Oldenburg.
2. Obwohl das Eisensalz der Nitrilitriessigsäure eine viel geringere Stabilität zeigte als Fe-EDTA, war sie doch wesentlich höher als bei den Eisensalzen der Monooxäthylaminodiessigsäure und Diäthanolaminoessigsäure.
 3. Mit Erhöhung des pH-Wertes nahm die Stabilität der Eisenchelatverbindungen (auch von EDTA) ab, so daß im kalkreichen Boden Dachau allgemein nur sehr geringe wasserlösliche Anteile aller vier Verbindungen enthalten waren.
 4. Alle Eisenchelatverbindungen werden im Laufe der Zeit zersetzt und sind dann mit den genannten Extraktionsverfahren nicht mehr extrahierbar.

III Der Einfluß steigender Eisernährung auf Ertrag, Eisengehalt und Eisenentzug von Maispflanzen.

Es wurden fünf Wasserkulturversuche mit Mais in zwei Vegetationsperioden durchgeführt.

1. Die im Schrifttum angegebenen Methoden zur Eisenbestimmung in pflanzlichem Material wurden in einigen Punkten modifiziert, und die Eisenbestimmung wurde nach folgender Arbeitsvorschrift ausgeführt:
Relativ kleine Mengen der Pflanzensubstanz (0,25-0,5 g) werden in konzentrierter HNO_3 ($s=1,4$) langsam verascht. Der Rückstand wird in 1n H_2SO_4 völlig aufgelöst. Ein Zusatz von verdünnter Phosphorsäure stabilisiert das $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ -Verhältnis in der Probelösung. Durch 20%ige Ammoniumacetatlösung wird der pH-Wert der Probelösung bei 4,8 (geeignetster pH-Bereich für die Eisenbestimmung) stabil gehalten. Nach der Reduktion des dreiwertigen Eisens mit schwefliger Säure erfolgt die kolorimetrische Bestimmung als Fe(II)-Dipyridylkomplex.
2. Erste Wirkungen des Eisens auf das Maiswachstum wurde wenige Tage nach der Eisenzufuhr in Form von Fe-Chlorid, Fe-EDTA und Eisencitrat sichtbar.
3. Die Maispflanzen zeigten in der Jugendentwicklung einen höheren Bedarf an Eisen als in späteren Wachstumsabschnitten.
4. Bei niedrigen Fe-Konzentrationen der Nährlösung traten bei

sämtlichen drei Eisenformen Eisenmangelsymptome bzw. Ertragsdepressionen an den Maispflanzen auf.

5. Eisenmangelsymptome werden nur durch eine bestimmte Eisenkonzentration der Nährlösung und nicht durch mehrmalige Nährlösungswechsel mit derselben niedrigen Eisenkonzentration behoben.
6. Von den verwendeten Eisenformen führte das Eisenchlorid zur stärksten Erniedrigung des pH-Wertes der Nährlösung, speziell in hohen Konzentrationen.
7. Bei der Steigerung der drei Eisenformen konnten unterschiedliche Wirkungsbereiche (Mangel, ausreichend und toxisch) beobachtet werden.

Zur Erzielung des Höchstsertrages benötigten die Maispflanzen höhere Fe-Konzentrationen in Form von Fe-EDTA (6,5-10,0 ppm Fe) als in Form von Fe-Chlorid (0,8-0,9 ppm Fe) und Fe-Citrat (0,3-1,6 ppm Fe). Wurde der pH-Wert der Nährlösung durch Neutralisation konstant gehalten, so waren zur Erzielung des Höchstsertrages höhere Eisenkonzentrationen erforderlich, und zwar 25,6 ppm Fe bei Fe-Chlorid und Fe-EDTA und 6,4 ppm Fe bei Fe-Citrat.

Ob dieser Befund auch für Nährlösungen anderer Zusammensetzung Gültigkeit besitzt, bleibt offen.

8. Die Eisenchelatpflanzen besaßen im zweiten und dritten Versuch der ersten Vegetationsperiode (1965) einen höheren Gehalt an Trockenmasse als die der anderen beiden Eisenformen. Diese Erscheinung konnte in der zweiten Vegetationsperiode (1966) nicht bestätigt werden.
9. Eine Neutralisation der Nährlösung äußerte sich in einem höheren Gehalt der Maispflanzen an Trockenmasse in allen Steigerungsstufen bei allen drei Eisenformen.
10. Ertragsdepressionen durch zu hohe Eisengaben führten zu einem Absinken des Gehaltes an Trockenmasse.
11. Die Ertragsbildung bei den Wurzeln verlief ähnlich wie bei den Sprossen.
12. Die drei Eisenformen können in Hinblick auf ihre Toxizität in der Reihenfolge Fe-Chlorid > Fe-Citrat > Fe-EDTA geordnet werden. Gemeinsam für alle drei Eisenformen äußert sich ih-

re toxische Wirkung vor allem im Ersatz der grünen Farbe des Chlorophylls durch rote Pigmente.

13. Die Fe-Konzentration der Nährlösung und nicht der Fe-Gehalt der Pflanzen spielt die Hauptrolle bei der Ausbildung des Höchstertrages. Die stark geschädigten Pflanzen der Kontrollreihe wiesen bei allen Versuchen einen höheren Fe-Gehalt als die Pflanzen im optimalen Ertragsbereich auf, bei denen meistens der niedrigste Fe-Gehalt anzutreffen war. Jedoch war der Eisenentzug durch die Pflanzen der Kontrollreihen niedriger als in Reihen mit normaler Ertragsbildung.
14. Ein bestimmter Einfluß der Form des zugeführten Eisens auf den Eisengehalt der Pflanzen (auch im Höchstertragsgebiet) konnte in diesen Untersuchungen nicht festgestellt werden.
15. Die Maispflanzen im Höchstertragsgebiet besaßen in allen normal behandelten (nicht neutralisierten) Wasserkulturen einen Eisengehalt ($\bar{x}$ Fe/g Tr.-Sub.) von 55-90 ppm Fe bei Fe-Chlorid-Ernährung, 55-78 ppm Fe bei Fe-EDTA-Ernährung und 46-106 ppm Fe bei Fe-Citrat-Ernährung.
16. Bei hohem Eisenangebot wird der Eisengehalt der Pflanzen erhöht, und es entstehen Ertragsdepressionen. Es erhöht sich dann nur noch der Eisengehalt, während der Eisenentzug wegen der starken Ertragsdepression absinkt.
17. Bei Neutralisation der Nährlösung ergaben sich nicht nur höhere Erträge, sondern auch die Eisengehalte der Maispflanzen waren ganz allgemein höher, insbesondere auch im Höchstertragsgebiet.
18. Die Wurzeln der Kontrollreihen wiesen wie bei den oberirdischen Teilen einen höheren Eisengehalt auf als die Wurzeln bei optimaler Ertragsbildung. Über das Höchstertragsgebiet hinaus stieg dann mit steigendem Eisenangebot der Eisengehalt und meistens auch der Eisenentzug durch die Wurzeln an. Die Wurzeln (auch im Höchstertragsgebiet) absorbierten mehr Eisen aus der Chlorid- und der Citrat-Form als aus der Chelat-Form. Ebenso wie bei den oberirdischen Teilen besaßen die Wurzeln in neutralisierter Nährlösung einen höheren Eisengehalt als bei nicht neutralisierter. Das trifft vor allen Dingen für Eisenchlorid und Eisencitrat zu.

19. Die Wirkung steigender Eisengaben auf den Ertrag erfolgt nach dem Wirkungsgesetz der Wachstumsfaktoren (nach MITSCHERLICH). Die Wirkungen des Eisens als Mikronährstoff, die sich in einer starken Ertragssteigerung bei der Zufuhr geringerer Mengen bzw. in einer Ertragsdepression bei der Zufuhr ebenfalls relativ geringer Mengen äußerten, machten die Berechnung des Wirkungswertes (c) dieses Nährstoffes schwierig. Der unterschiedliche Verlauf der bei den vorliegenden Untersuchungen erhaltenen Ertragskurven bzw. die unterschiedlichen Einwirkungen verschiedener Eisenformen auf den Maisertrag, führten zu großen Abweichungen bei der Berechnung des c-Wertes. Aus den Ergebnissen des zweiten Versuches im Jahre 1965 wurde mit Hilfe der MITSCHERLICH'schen Formel (1. Annäherung) der Wirkungswert des Eisens errechnet, einmal in Abhängigkeit von der Höhe der Düngergabe (n. MITSCHERLICH), zum anderen in Abhängigkeit von der durch die Maispflanzen aufgenommenen Eisenmenge (auf Grund der Vorstellungen RIPPELS). Bei der c-Wert-Berechnung unter Zugrundelegung der Fe-Düngung ergaben sich für Eisen in den einzelnen Formen die folgenden Werte für "c": Eisenchlorid 265, Fe-EDTA 198 und Eisencitrat 417. Bei Berechnung des c-Wertes nach der aufgenommenen Fe-Menge ergaben sich für Eichlorid 471, für Eisencitrat 746 und für Eisenchelat Werte zwischen 184 und 905. Die Inkonstanz der für "c" erhaltenen Werte innerhalb eines Versuches läßt die Berechnung des "Schädigungsfaktor k" sehr problematisch erscheinen.

IV Absorption des Eisens an den Wurzeln, Translokation und Akkumulation des aufgenommenen Eisens durch junge Sonnenblumenpflanzen.

In diesen Untersuchungen nahmen junge Sonnenblumenpflanzen 8 Std. lang nichtmarkiertes und danach 15 Std. lang mit ⁵⁹Fe markiertes Eisen in Form von Fe-Chlorid, Fe-EDTA oder Fe-Citrat auf.

1. Bei allen drei Eisenformen absorbierten die Pflanzenwurzeln mehr Eisen aus der Nährlösung mit 0,1 ppm Fe (nicht ausreichende Eisenversorgung) als aus der 1,0 ppm Fe enthaltenden Nährlösung.

2. Die Wurzeln der mit Fe-Chlorid ernährten Pflanzen enthielten den höchsten Gehalt an ^{59}Fe .
3. Das Stengelexsudat bei 0,1 ppm Fe in der Nährlösung (mit stärkerer Eisenabsorption an den Wurzeln) enthielt weniger ^{59}Fe als die Pflanzen, die in 1,0 ppm Fe haltiger Nährlösung (mit niedrigerer Eisenabsorption an den Wurzeln) wuchsen.
4. Eine sichere Beziehung zwischen der Ernährung mit den verschiedenen drei Eisenformen und der ausgeschiedenen Exsudatmenge konnte in diesen Untersuchungen nicht festgestellt werden. Ebenfalls bestand kein Zusammenhang zwischen der ausgeschiedenen Exsudatmenge und ihrem ^{59}Fe -Gehalt.
5. Der Gehalt des Stengelexsudats an ^{59}Fe war bei der Ernährung mit Fe-EDTA und Fe-Citrat höher als bei Fe-Chlorid, möglicherweise auf Grund der gleichzeitigen Aufnahme von ^{59}Fe und der EDTA- und Citrat-Komponenten oder deren Abbauprodukte.
6. In den oberirdischen Teilen war unabhängig von der Eisenform in der Nährlösung $2/3 - 3/4$ des in 15 Std. aufgenommenen ^{59}Fe in einer EDTA-Extraktionslösung noch löslich.

V Die Wirkung des Eisens auf den Proteinstoffwechsel in Maispflanzen.

Hierfür wurde ein Wasserkulturversuch (Dauer 36 Tage) mit Mais durchgeführt. Die Ernte erfolgte zu zwei Terminen, die erste nach 17 Tagen und die zweite am Ende des Versuches. Durch Bestimmung der Aminosäuren in der löslichen (alkohollöslichen) N-Fraktion sollten Zusammenhänge zwischen steigender Eisenversorgung (als Fe-EDTA) und Proteinstoffwechsel näher untersucht werden.

1. Die oberirdischen Teile der Eisenmangelpflanzen der ersten Ernte (bei 0,2 ppm Fe) besaßen den höchsten Entzug an löslichem N des gesamten Versuches. Die weitere Erhöhung der Fe-Konzentration der Nährlösung über 0,2 ppm Fe setzte den Entzug bzw. den Gehalt an löslichem N in dieser Ernte herab.
2. Der relativ hohe Gehalt an löslichem N in den oberirdischen Teilen der Eisenmangelpflanzen (0,2 ppm Fe) wurde bei der zweiten Ernte nicht bestätigt. Dagegen enthielten die oberirdischen Teile der ohne Eisen ernährten Pflanzen in der

zweiten Ernte einen wesentlich höheren Gehalt an löslichem N als in der ersten Ernte. Die optimal gewachsenen Pflanzen (bei 6,4 ppm Fe) waren relativ arm an löslichem N. Ein höherer Gehalt an löslichem N wurde wieder in den Sprossen der mit überschüssigem Eisen (204,8 ppm Fe) ernährten Pflanzen der zweiten Ernte ermittelt.

3. In beiden Ernten wiesen die Wurzeln der Eisenmangelpflanzen (0,2 ppm Fe) einen höheren Gehalt an löslichem N auf.
4. Bei den Kontrollpflanzen der ersten Ernte bestand der größte Anteil der löslichen N-Fraktion aus freiem Alanin. Die Konzentration an Glycin, Serin, γ -Aminobuttersäure, Asparagin und Glutamin waren in diesen Pflanzen ebenfalls relativ hoch. Die absolute Menge des löslichen N war aber gering im Vergleich zu den gleichen Pflanzen der zweiten Ernte, die beachtlich höhere Gehalte an den meisten AS (speziell Alanin und Asparagin) enthielten.
5. Die Eisenmangelpflanzen (0,2 ppm Fe) der ersten Ernte, die den höchsten Gehalt an löslichem N besaßen, enthielten wie die Kontrollpflanzen sehr große Mengen an freiem Alanin. Die Konzentrationen an freiem Arginin und Serin waren ebenfalls hoch. Das verstärkte Auftreten von Störsubstanzen machte die Untersuchung der Eisenmangelpflanzen der zweiten Ernte unmöglich.
6. Die Pflanzen der Eisenstufe 6,4 ppm Fe enthielten bei der ersten Ernte höhere Konzentration an freiem Arginin (der größte Anteil), Alanin und Glutamin. Bei der zweiten Ernte verschwand das Arginin völlig.
7. Bei der Eisenstufe 25,6 ppm Fe der ersten Ernte enthielten die Pflanzen niedrige Konzentrationen an freien AS, im Gegensatz zur zweiten Ernte, wo erstaunlich hohe Gehalte an freiem Arginin, Asparaginsäure und Glutamin vorhanden waren.
8. Die Pflanzen der Eisenstufe 204,8 ppm Fe, bei der die Toxizität des Eisens in Erscheinung trat, enthielten in der ersten Ernte sehr niedrige Konzentrationen an freien AS. In der zweiten Ernte war die sehr hohe Konzentration an freiem Alanin bemerkenswert.
9. Die Wurzeln der ohne Eisen ernährten Pflanzen wiesen einen

hohen Gehalt an freiem Alanin in der ersten Ernte und an freiem Alanin und Asparagin in der zweiten Ernte auf. Bei den Eisenstufen 0,2 und 6,4 ppm Fe waren in beiden Ernten bemerkenswert die hohen Gehalte an Asparaginsäure, Alanin und Glutamin, bei 0,2 ppm Fe außerdem an Arginin. Bei toxischer Eisenversorgung (204,8 ppm Fe) enthielten die Wurzeln hohe Gehalte an löslicher Asparaginsäure und Alanin in der ersten Ernte, an Alanin, Asparaginsäure und Asparagin in der zweiten Ernte.

10. Sowohl Eisenmangel als auch überschüssiges Eisen setzten den Gehalt der Sprosse an unlöslichem N bzw. Protein-N herab.
11. Die Wurzeln der Eisenstufen 0,2; 6,4 und 25,6 ppm Fe wiesen in beiden Ernten die höchsten Gehalte an unlöslichem N auf.

E Literaturverzeichnis

- 1.) AGARWALA, S.C. u.
SHARMA, C.P.:
The effect of iron and manganese supply on the tissue concentration of macro-and micro-nutrient elements in barley plants grown in sand culture.
Naturwissenschaften. 48, 506-507, 1961
- 2.) "-"
The relation of iron supply to the tissue concentration of iron, chlorophyll and catalase in barley plants grown in sand culture.
Physiol. Plantarum. 14, 275-283, 1961
- 3.) AGARWALA, S.C.,
SHARMA, C.P. u.
KUMAR, A.:
Interrelationship of iron and manganese supply in growth, chlorophyll and iron porphyrin enzymes in barley plants.
Plant Physiol. 39, 271-276, 1964
- 4.) AGARWALA, S.C.,
SHARMA, C.P. u.
FAROOG, S.:
Effect of iron supply on growth, chlorophyll, tissue iron and activity of certain enzymes in maize and radish.
Plant Physiol. 40, 493-499, 1965
- 5.) ATANASIU, N.:
Das Wirkungsgesetz der Wachstumsfaktoren und seine Bedeutung für Forschung und Praxis in der Landwirtschaft.
Berlin Sitzungsber. Bd. III, H. 14, Verl. S. Hirzel, Leipzig 1954
- 6.) ATKINSON, H.J. u.
WRIGHT, J.R.:
Chelating and vertical movement of soil constituents.
Soil Science. 84, 1-11, 1957
- 7.) BACON, P.C.,
DEKOCK, P.L. u.
PALMER, M.J.:
Aconitase levels in leaves of iron deficient mustard plants (*Sinapis alba*).
Biochem. J. 80, 64-70, 1961
- 8.) BAHN, K.C.,
WALLACE, A. u.
KROHN, E.J.:
Effect of pH and nitrogen source on the ability of corn and soybean to obtain iron chelated with ethylenediamine di-o-hydroxyphenylacetate.
Agron. J. 54, 119-121, 1962

- 9.) BAR-AKIVA, A.: Biochemical indicators as a means of distinguishing between iron and manganese deficiency symptoms in citrus plants.
Nature. 190, 647-648, 1961
- 10.) BENNET, J.P.: Iron in leaves.
Soil Science. 60, 91-105 1945
- 11.) BIDDULPH, O. u. WOODBRIDGE, C.O.: The uptake of phosphorus by bean plants with particular reference to the effect of iron.
Plant Physiol. 27, 431-444, 1952
- 12.) BOLLE-JONES, E.W.: Nutrient levels and flower production in potato.
Physiol. Plantarum. 7, 698-703, 1954
- 13.) -"- The interrelationship of iron and potassium in the plant.
Plant and Soil. VI, 129-173, 1955
- 14.) BOULD, C.: Chelated iron compounds for correction of lime-induced chlorosis.
Nature. 175, 90-91, 1955
- 15.) BRADFORD, G.R., POATT, P.F., BAIR, F.L. u. GOULBEN, B.: Separation and determination of total Al, Mg, Ni, Mn, Co, Cu, Fe, Mo and Zn in soils.
Soil Science. 100, 309-418, 1965
- 16.) BRANDENBURG, E., SCHNEIDER, A. u. EIBNER, R.: Eisen und Molybdänmangel auf saurem Hochmoorböden.
Landw. Forsch. 17, Sonderh. 104-112, 1963
- 17.) BRANTON, D. u. JACOBSON, L.: Iron transport in pea plants.
Plant Physiol. 37, 539-595, 1962
- 18.) -"- Iron localization in pea plants.
Plant Physiol. 37, 546-551, 1962
- 19.) BROWN, J.C. u. HENDRICKS, S.B.: Enzymatic activities of copper and iron deficiencies in plants.
Plant Physiol. 27, 651-660, 1952

- 20.) BROWN, J.C.: The effect of the dominance of a metabolic system requiring iron or copper on the development of lime-induced chlorosis.
Plant Physiol. 28, 495-502, 1953
- 21.) BROWN, J.C. u.
HOLMES, R.S.: Iron, the limiting element in a chlorosis.
Plant Physiol. 30, 451-457, 1955
- 22.) BROWN, J.C.,
HOLMES, R.S.,
SHAPIRO, R.E. u.
SPECHT, A.W.: Effects of phosphorus and copper salts on iron chlorosis of rice flooded and nonflooded soil and associated enzymatic activity.
Soil Science. 79, 363-372, 1955
- 23.) BROWN, J.C. u.
HOLMES, R.S.: Iron supply and interacting factors related to lime-induced chlorosis.
Soil Science. 82, 507-519 1956
- 24.) BROWN, J.C.,
HOLMES, R.S. u.
TIFFIN, L.D.: Hypothesis concerning iron chlorosis.
Soil Sci. Am. Proc. 23, 231-234, 1959
- 25.) BROWN, J.C.,
TIFFIN, L.D.,
HOLMES, R.S.,
SPECHT, A.W. u.
RESNICKY, J.W.: Lateral inactivation of iron in soybeans as affected by root growth medium.
Soil Science. 87, 89-95, 1959
- 26.) BROWN, J.C.,
LUNT, D.R.,
HOLMES, R.S. u.
TIFFIN, L.D.: The bicarbonate ion as an indirect cause of iron chlorosis.
Soil Science. 88, 260-266, 1959
- 27.) BROWN, J.C.,
TIFFIN, L.D. u.
HOLMES, R.S.: Reductive capacity of roots and competition between chelating agents and roots as factors affecting the absorption of iron by plant species.
Plant Physiol. 35, XXIV, 1960
- 28.) BROWN, J.C.: An evaluation of bicarbonate induced iron chlorosis.
Soil Science. 89, 246-247, 1960
- 29.) BROWN, J.C.,
TIFFIN, L.D. u.
HOLMES, R.S.: Competition between chelating agents and roots as factors affecting absorption of iron and other ions by plants species.
Plant Physiol. 35, 878-886, 1960

- 30.) BROWN, J.C.,
TIFFIN, L.D.,
SPECHT, A.W. u.
RESNICKY, J.W.: Iron absorption by roots as affected
by plants species and concentration
of chelating agents.
Agron. J. 53, 81-85, Stuttgart 1961
- 31.) "- Stability and concentration of metal
chelates factors in iron chlorosis
in plants.
Agron. J. 53, 85-93, 1961
- 32.) BROWN, J.C. u.
TIFFIN, L.D.: Properties of chelates and their use
in crop production.
J. Agric. Food Chem. 10, 192-195, 1962
- 33.) BROWN, J.C.: Iron chlorosis in soybeans as related
to the genotype of rootstock.
Soil Science. 96, 387-394, 1963
- 34.) BROWN, J.C. u.
FOY, C.D.: Effect of Cu on the distribution of
P, Ca and Fe in barley plants.
Soil Science. 98, 362-369, 1964
- 35.) BROWN, A.L.,
YAMAGUCHI, S. u.
LEAL-DIAZ, J.: Evidence for translocation of iron
in plants.
Plant Physiol. 40, 35-38, 1965
- 36.) BROWN, J.C. u.
TIFFIN, L.D.: Iron stress as related to the iron
and citrat occurring in stem-exudate.
Plant Physiol. 40, 395-400, 1965
- 37.) BROWN, J.C.: Fe and Ca uptake as related to root-
sap and stem-exudate citrate in soy-
beans.
Physiol. Plantarum. 19, 968-976, 1966
- 38.) "- Differential uptake of Fe and Ca by
two corn genotypes.
Soil Science. 103, 331-338, 1967
- 39.) BUCHNER, A.: Zur Heilung der Kalkchlorose (Gelb-
sucht) im Obstbau.
Gartenbau H. 2, 30-31, 1956
- 40.) BURSTRÖM, H. u.
TULLIN, V.: Observation on chelates and roots
growth.
Physiol. Plantarum. 10, 406-417, 1957
- 41.) BURSTRÖM, H.: Growth action of EDTA in light and
darkness.
Physiol. Plantarum. 14, 354-377, 1961

- 42.) CARELL, E. u.
FAND-PRICE, C.A.: Porphyrin and iron requirement for chlorophyll formation in euglena.
Plant Physiol. 40, 1-7, 1965
- 43.) CARLSON, C.W. u.
OLSEN, R.V.: Iron-manganese ratio in nutrient solutions in relation to the chlorosis of sorghum plants.
Proc. Soil Sci. Am. 15, 251-254, 1950
- 44.) CHAVKIN, E.E.: Die Eisenanreicherung in Blättern als Altersfunktion.
Landw. Zentralblatt, Teil I, 669, 1965
- 45.) CHESNIN, L.: Chelates and the trace elements nutrition of corn (maiz).
Agric. Food Chem. 11, 118-122, 1963
- 46.) CHRUSLOVA, J.S.G.: Der Einfluß beweglicher Phosphate auf die Ernährung der Pflanzen mit Eisen.
Agrochemija, Moskva. Nr. 8, 65-69, 1965
Landw. Zentralblatt. Teil II, 1255, 1966
- 47.) CLARK, F.E.,
NEARPASS, D.C. u.
SPECHT, A.W.: Influence of organic additions and flooding on iron and manganese uptake by rice.
Agron. J. 49, 586-589, 1957
- 48.) CLARK, J.S.: Al and iron in relation to exchangable hydrogen in soil.
Soil Science. 98, 302-306, 1964
- 49.) CLAUSER, R. u.
JENNY, H.: Two-phase studies on availability of iron in calcareous soils. I. Experiments with alfalfa plants.
Agrochemica Vol. IV, 263, 1960
- 50.) COULSON, C.B.,
DAVIS, R.L. u.
LEWIS, D.A.: Polyphenols in plants, humus and soil. II. Reduction and transport by polyphenols of iron in model soil columns.
J. Soil Science. 11, 30-44, 1960
- 51.) DEKOCK, P.L.: Iron nutrient of plant at high pH.
Soil Science. 79, 167-175, 1955

- 52.) DEKOCK, P.L.: The phosphorus-iron relationship in
genetical chlorosis.
Plant Physiol. 30, 293-295, 1955
- 53.) DEKOCK, P.L. u.
MITCHEL, R.L.: Uptake of chelated metals by plants.
Soil Science. 84, 55-62, 1957
- 54.) DEKOCK, P.L. u.
MORRISON, R.L.: The metabolism of chlorotic leaves.
1. Amino acids.
Biochem. J. 70, 266-272, 1958
- 55.) "- The metabolism of chlorotic leaves.
2. Organic acids.
Biochem. J. 70, 272-277, 1958
- 56.) DEKOCK, P.L.,
COMMISIONG, K.,
FARMER, V.C. u.
INKSON, R.H.E.: Interrelationship of catalase, per-
oxydase, hematin and chlorophyll.
Plant Physiol. 35, 599-604, 1960
- 57.) DEKOCK, P.L.,
HALL, A. u.
McDONALD, M.: A correlation between the ratio of
phosphorus to iron and potassium to
calcium in mustard leaves.
Plant and Soil. XII, 128-142, 1960
- 58.) DEKOCK, P.L. u.
INKSON, R.H.E.: Manganese contain of mustard leaves
in relation to iron and makro (major)
nutrient supply.
Plant and Soil. 17, 183-190, 1962
- 59.) DONEY, R.E.,
SMITH, L. u.
WIEBE, H.: The effects of various levels of
 HCO_3 , P and pH on translocation of
foliar applied Fe in plants.
Soil Science. 89, 269-275, 1960
- 60.) DRIEL, W.: The effect of iron EDTA on the
growth and metabolism of tomato in
water culture.
Plant and Soil. 20, 85, 1964
- 61.) "- Biochemische Aspekte der Eisenman-
gelbekämpfung in der Pflanze.
Landboakund. Tijdschr. 77, Nr. 21,
823-834, 1965
Landw. Zentralblatt. Teil II, 2066,
1966
- 62.) EDDINGS, J.L. u.
BROWN, A.L.: Absorption and translocation of fo-
liar applied iron.
Plant Physiol. 42, 15-19, 1967

- 63.) EDWIN, D.,
KURTZ, J. u.
MAIER, R.H.: Acid chlorosis and iron uptake
by sorghum grown in solution
culture.
Agron. J. 52, 486-487, 1960
- 64.) ELGALA-ABDELMONEM, M. u.
MAIER, R.H.: Chemical forms of plant and soil
iron as influenced by soil
moisture.
Plant and Soil. 21, Nr. 2,
201-212, 1964
- 65.) GERALD, G.,
STOUT, P.R. u.
JOREN, L.H.P.: Molybdenum-manganese-iron-anta-
gonismus in the nutrition of to-
mato plants.
Plant Physiol. 34, 608-613, 1959
- 66.) GEREI, L.: Untersuchungen der Bildung von
Eisenkonkretionen im Boden bei
Modellversuchen mit ⁵⁹Fe Isotopo.
Landw. Zentralblatt. Teil I,
646-647, 1962
- 67.) GINGRICH, J.R.: Einfluß der Bodentemperatur auf
die Eisenchlorose bei Sorghum.
Agron. J. 56, 599-601, 1964
- 68.) GRUNES, D.L. u.
JENNY, H.: Two-phase studies an availabili-
ty of iron in calcarous soils.
2. Decomposition of colloidal
iron hydroxide by iron exchan-
gers.
Agrochemica. 4, 279-287, 1960
- 69.) GUEST, P.L.: Root-contact phenomena in rela-
tion to iron nutrition and growth
of citrus.
Proc. Am. Soc. Sci. 44, 43-48,
1944
- 70.) HACKER, B.,
ZIMMERMANN, A. u.
RECHMANN, H.: Über die Rhodan-colorimetrische
Bestimmung kleiner Eisenmengen.
Zeitschr. Anal. Chemie. 129,
104-125, 1949
- 71.) HAERTEL, F.J.: Metal chelates in plant nutri-
tion.
J. Agric. Food Chem. 11, Nr. 2
108-111, 1963

- 72.) HALE, V.Q. u.
WALLACE, A.: Bicarbonate and phosphorus effects on uptake and distribution in soybeans of iron chelated with ethylenediaminedi-o-hydroxyphenylacetate.
Soil Science. 89, 285-287, 1960
- 73.) "- Effect of pretreatment with chelating agents or with ⁵⁹Fe on ⁵⁹Fe distribution in plants.
Crop. Sci. Nr. 5, 489-491, 1964
- 74.) HEATH, O.V. u.
CLARK, J.E.: Chelating agents as plant growth substance. A possible clue to the mode of action of auxin.
Nature. 177, 1118-1121, 1956
- 75.) HEWITT, E.J.: Relation of manganese and some other metals to the iron status of plants.
Nature. 161, 489, 1948
- 76.) HILL-COTTINGHAM, D.G.: Photosensitivity of iron chelates.
Nature. 175, 347-348, 1955
- 77.) "- A spectrophotometric analysis of chelate solution and its application to the study of iron chelates in soil and plants.
Soil Science. 84, 43, 1957
- 78.) HILL-COTTINGHAM, D.G. u.
LLOYD, G.P.: Behaviour of iron chelates in calcareous soils. III. Laboratory experiments with a further range of chelating agents.
Plant and Soil. 10, 194, 1958
- 79.) "- Absorption and breakdown of iron-EDTA by tomato plants.
Nature. 189, 312, 1961
- 80.) HÖFNER, W. u.
HERWIG, K.: Manganeinfluß auf Volumen und osmotischen Wert des Exsudates junger Sonnenblumen.
Physiol. Plantarum. 19, 31-39, 1966

- 81.) HOLLEY, R.W. u.
CAIN, J.C.: Accumulation of arginine in plants affected with iron-deficiency type chlorosis.
Science. 121, 172-173, 1955
- 82.) HOLMES, D.R. u.
BROWN, J.C.: Chelates as corrective for chlorosis.
Soil Science. 80, 167-179, 1955
- 83.) HOLMES, R.S.: Effect of phosphorus and pH on iron chlorosis of the blueberry in water culture.
Soil Science. 90, 374-379, 1960
- 84.) ILJIN, W.S.: Metabolism of plants affected with lime-induced chlorosis (Calciose) I. Nitrogen metabolism.
Plant and Soil. 3, 239-256, 1951
- 85.) -"- Metabolism of plants affected with lime-induced chlorosis. II. Organic acids and carbohydrates.
Plant and Soil. 3, 339-352, 1951
- 86.) -"- Metabolism of plants affected with lime-induced chlorosis. III. Mineral elements.
Plant and Soil. 4, 11-28, 1953
- 87.) INGALLS, R.A. u.
SHIVE, J.W.: Relation of H-Ion concentration of tissue to the distribution of iron in plants.
Plant Physiol. 6, 103-124, 1931
- 88.) JACOBSON, L.: Iron in the leaves and chloroplasts of some plants in relation to their chlorophyll content.
Plant Physiol. 20, 223-245, 1945
- 89.) JACOBSON, L. u.
DERTH, J.J.: The relationship between iron and chlorophyll content in chlorotic sunflower leaves.
Plant Physiol. 31, 199-204, 1956
- 90.) JENNY, H.: Die Grenzzone von Wurzel und Boden in ihrer Bedeutung für die Aufnahme von Eisen aus kalkhaltigen Boden.
Wein-Wiss. 20, Nr. 2, 49-61, 1965

- 91.) JUNG, J.: Die Eisenversorgung der Pflanzen mit Chelaten.
Landw. Forsch. Sonderh. Nr. 16,
84-92, 1962
- 92.) KELLER, T. u.
KOCH, W.: The effect of iron chelate fertili-
zation of poplar upon CO_2 -uptake,
leaf size and content of leaf pig-
ments and iron.
Plant and Soil. 20, 116, 1964
- 93.) KELLERMANN, V.V. u.
GURUPA, L.G.: Über die Rolle des Eisens und orga-
nischer Substanzen bei der Umstruk-
turierung tonhaltiger Komponenten
des Bodens.
Landw. Zentralblatt. 1138, 1967
- 94.) KIRSCH, R.K.,
HARWARD, M.E. u.
PETERSON, R.G.: Interrelationships among iron, manga-
nese and molybdenum in the growth and
nutrition of tomato grown in culture
solution.
Plant and Soil. 12, 259-275, 1960
- 95.) KNEZEK, B.D. u.
MAIER, R.H.: Fractionation of iron chlorotic and
nonchlorotic leaf tissue.
J. Agric. Food Chem. 14, Nr. 3,
266-268, 1966
- 96.) KOLESNIKOV, P.A. u.
MUTUSKIN, A.A.: Die Verteilung des Eisens beim Keim
der Samen und während des Wachstums
der Weizenkeimlinge.
Landw. Zentralblatt. Teil III, 3287,
1964
- 97.) KRISCHNA-MURTI, O.,
VOLK, V.V. u.
JACKSON, M.L.: Colorimetric determination of iron
of mixed valency by orthophenanthro-
line.
Proc. Soil Sci. Am. 30, 663, 1966
- 98.) KROLL, H.: The ferric chelate of ethylenediamine-
di-o-hydroxyphenyl acetic acid for
lime-induced chlorosis.
Soil Science. 84, 51-53, 1957
- 99.) LAMB, A.B. u.
JACOQUEST : The slow hydrolysis of ferric chlo-
ride in dilute solution. 1. The
change in conductance, color and
chloride ion concentration.
J. Am. Chem. Soc. 60, 967, 1938

- 100.) LAMB, A.B. u.
JACOQUEST : The slow hydrolysis of ferric chloride in dilute solution. 2. The change in hydrogen ion concentration. J. Am. Chem. Soc. 60, 1215-1228, 1938
- 101.) LANGE, B.: Bestimmung von Eisen mit α, α' -Dipyridyl und $\alpha, \alpha', \alpha''$ -Tripyridyl. Kolorimetrische Analyse. Vierte Auflage. 112, 1952 Verlag Chemie, GmbH. Weinheim/Bergstr.
- 102.) LEHMANN, D.S.: Some principals of chelating chemistry. Proc. Soil Sci. Am. 27, 167-170, 1963
- 103.) LINDSAY, W.L. u.
THORNE, D.W.: Bicarbonate ion and oxygen levels as related to chlorosis. Soil Science. 77, 271-279, 1954
- 104.) LINGLE, J.C.,
TIFFIN, L.D. u.
BROWN, J.C.: Iron uptake transport of soybeans as influenced by other cations. Plant Physiol. 38, 71-76, 1963
- 105.) LUNT, D.R.,
HEMAIDAN, N. u.
WALLACE, A.: Reactions of some polyamine, polyacetate iron chelates in various soils. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 20, 172-175, 1956
- 106.) MAJUNDER, S.K. u.
DUNN, S.: Effect of metal chelates on growth of corn in solution culture. Plant Physiol. 33, 166, 1958
- 107.) MARSH, H.V.,
EVANS, J.R. u.
MATRONE, G.: Investigation of the role of iron in chlorophyll metabolism: Effect of iron deficiency on chlorophyll and heme content and on the activities of certain enzymes in leaves. Plant Physiol. 38, 638-642, 1963
- 108.) MARTELL, A.E.: The chemistry of metal chelates in plant nutrition. Soil Science. 84, 13-26, 1957
- 109.) MARTELL, A.E. u.
CALVIN, M.: Die Chemie der Metallchelateverbindungen. Verlag Chemie, GmbH. Weinheim/Bergstr. 1958

- 110.) MARTIN, J.P.,
 ERVIN, J.D. u.
 SHEPHARD, R.A.: Decomposition of the iron, aluminium, zinc and copper salts or complexes of some microbial and plant polysaccharides in soil.
Proc. Soil Sci. Soc. Am. 30,
196-200, 1966
- 111.) McKAGNE, J.A.: The fixation of Fe^{+2} by oxides in soils.
Canad. J. Soil. 14, Nr. 1, 91-92,
1966
- 112.) MILLER, G.W.,
 BROWN, J.C. u.
 HOLMES, R.C.: Chlorosis in soybeans as related to iron, phosphorus, bicarbonate and cytochrome oxidase activity.
Plant Physiol. 35, 619 in press 1960
- 113.) MITSCHERLICH, E.A.: Zur Konstanz des Wirkungsfaktors eines Wachstumsfaktors.
z.F. Pflanzenernähr. u. Düngg. A.
VII, 13-15, 1926
- 114.) "- Die Ertragsgesetze.
Deutsche Akademie der Wissenschaften
zu Berlin. Vorträge und Schriften.
Heft 31, Akademie Verlag, 1948
- 115.) "- Das Wirkungsgesetz der Wachstumsfaktoren.
Bodenkunde für Landwirte, Forstwirte
u. Gärtner. 6. Auflage, Max Niemeyer
Verlag Halle/Saale, 1950
- 116.) NICHOLAS, D.J.S. u.
 BOULD, C.: Some problems associated with determining iron in plants.
Nature. 177, 336-337, 1956
- 117.) OERTLI, J. u.
 JACOBSON, L.: Some quantitative considerations in iron nutrition of higher plants.
Plant Physiol. 35, 683-688, 1960
- 118.) OLSEN, C.: Iron uptake in different plant species as a function of the pH value of the nutrient solution.
Physiol. Plantarum. 11, 889-905,
1958

- 119.) OSTROVSKAJA, L.K. u. OVCARENKO, G.A.: Aufnahme, Translokation und Assimilation des Eisens in den Pflanzen. Agrochimija, Moskva. Nr. 1, 100-108 Landw. Zentralblatt. Teil III, 2605 1966
- 120.) PERKINS, H.F. u. PURVIS, E.R.: Soil and plant studies with chelates of EDTA. Soil Science. 78, 325-330, 1954
- 121.) PERUR, N.G., SMITH, R.L. u. WIEBE, H.: Effect of iron chlorosis on protein fraction of corn (Maiz) leaf tissue. Plant Physiol. 36, Nr. 6, 736-739 1961
- 122.) PORTER, L.K. u. THORNE, D.W.: Interrelation of carbon dioxyde and bicarbonate ions in causing plant chlorosis. Soil Science. 79, 373-382, 1955
- 123.) POZUELO, M.R. u. GROSSENbacher, K.: Uptake of insoluble iron by sterile and nonsterile alfalfa plants. Agrochemica. 9, 361, 1965
- 124.) REDISKE, J.H. u. BIDDULPH, D.: The absorption and translocation of iron. Plant Physiol. 28, 576-593, 1953
- 125.) RIEHM, H.: Die Herstellung der Doppellaktat-Boden-Extraktionslösung. Methodenbuch I, Die Untersuchungen von Böden, 2. Auflage 164. Verlag J. Neumann-Neudamm Hamburg 1949.
- 126.) RIEKELS, J.W. u. LINGLE, J.C.: Iron uptake and translocation by tomato plants as influenced by root temperature and manganese nutrition. Plant Physiol. 41, 1095-1101, 1966
- 127.) RUBINS, E.J. u. HAGSTROM : Determination of aluminium and iron in plant tissue. J. Agric. Food Chem. 7, 722-724 1959
- 128.) SANDEL, E.B.: Colorimetric determination of traces of metals. Third Edition. 522-554, Interscience Publishers. Inc. New York. 1959

- 129.) SARIC, M. u.
CURIC, R.: The uptake of P, Ca, S and Fe by the plants in dependence of temperature. Agrochemica. 7, Nr. 2 173-184, 1963
- 130.) SCHATZ, A.: Bodenbildung und Ertragssteigerung durch "Chelatisierung". D. Umschau in Wissensch. U. Technik. 55, 746, 1955
- 131.) "- -" Soil microorganisms and soil chelation. The pedogenic action of lichens and lichen acids. Agric. and Food Chem. Vol. 11, 112, 1963
- 132.) SCHAUMLOFFEL, E.: Über die kolorimetrische Bestimmung der Mikronährstoffe Kupfer, Zink, Kobalt, Mangan, Eisen und Molybdän aus einer Aschenlösung durch fraktionierte Extraktion. Landw. Forsch. 13, 278-286, 1960
- 133.) "- -" Über die photometrische Bestimmung von Cu, Zn, Co, Mn, Fe und Mo in Böden, Düngemittel und physiologischen Flüssigkeiten. Land. Forsch. 15, 60-63, 1962
- 134.) SCHILLING, G. u.
RICHTER, D.: Untersuchungen über die Bildung von Eisen an anorganischen Bodenbestandteilen. Thaer-Arch. 11, Nr. 1 3-8, 1967
- 135.) SCHMID, W.E. u.
GERLOFF : A naturally occurring chelate of iron in xylem exudate. Plant Physiol. 36, 226-231, 1961
- 136.) SCHNITZER, M. u.
SKINNER, S.L.M.: Organo-metallic interacting in soils. 2. Reactions between different forms of iron and Al and the organic matter of a podzol Bh horizon. Soil Science. Vol. 96, 181-186, 1963
- 137.) SCHROPP, W.: Zur Eisenversorgung der Pflanzen bei Wasserkulturversuchen. Bodenk. u. Pflanzenernährg. 9/10, 653-665, 1938

- 138.) SHETTY, A.S. u.
MILLER, G.W.: Influence of iron chlorosis on pigment and protein metabolism in leaves of nicotiana tabacum L.
Plant Physiol. 41, Nr. 3 415-421, 1966
- 139.) SIMON, J.N.,
SWIDLER, R. u.
BENEDICT, H.M.: Absorption of chelated iron by soybean roots in nutrient solutions.
Plant Physiol. 37, 460-466, 1962
- 140.) "- Kinetic studies of regreening of iron deficient soybeans.
Plant Physiol. 38, 667, 1963
- 141.) SINGH, R.M.: Wirkung von Eisen auf das Wachstum von Weizen in Beziehung zur Blattfläche und Chlorophyllgehalt.
Sci. 8, cult. Calcutta, 31, Nr. 2 98-99, Landw. Zentralblatt. Teil III, 3310, 1965
- 142.) STEWART, L. u.
LEONARD, C.D.: Chelates as sources of iron for plants growing in the field.
Science. 116, 564, 1952
- 143.) "- Use of chelates in citrus production in florida.
Soil Science. 84, 87-97, 1957
- 144.) SIMPSON, M.V.: Protein Biosynthesis.
Ann. Rev. Biochem. 31, 333, 1962
- 145.) THOMAS, G.W. u.
COLEMAN, N.T.: The fate of exchangeable iron in acid clay systems.
Soil Science. 97, 229-232, 1964
- 146.) THOMPSON, J.F. u.
STEWART, F.C.: Investigation on nitrogen compounds and nitrogen metabolism in plants. II. Variables in two-directional paper chromatography of nitrogen compounds: A quantitative procedure.
Plant Physiol. 26, 421-440, 1951
- 147.) THORNE, D.W.,
WANN, F.B. u.
ROBINSON, W.: Hypothesis concerning lime-induced chlorosis.
Soil Sci. Soc. Am. Proc. 15, 254, 1950

- 148.) TIFFIN, L.D. u.
BROWN, J.C.: Absorption of iron chelate by sun-
flowers roots.
Science. 130, 274-275, 1959
- 149.) TIFFIN, L.D.,
BROWN, J.C. u.
KRAUSS, R.W.: Differential absorption of metal che-
late components by plant roots.
Plant Physiol. 35, 362-367, 1960
- 150.) TIFFIN, L.D.,
BROWN, J.C. u.
HOLMES, R.S.: Chelating agent and plant nutrient
interactions affecting the iron nu-
trition of soybeans.
Soil Sci. Soc. Am. Proc. 24, 120-123
1960
- 151.) TIFFIN, L.D. u.
BROWN, J.C.: Selective absorption of iron from
iron chelates by soybeans plants.
Plant Physiol. 36, 710-714, 1961
- 152.) "- Iron chelates in soybeans exudate.
Science. 135, 311-313, 1962
- 153.) TIFFIN, L.D.: Iron translocation. 1. Plant culture,
exudate, sampling, iron-citrat ana-
lysis.
Plant Physiol. 41, Nr. 3 510-514,
1966
- 154.) "- Iron translocation. II. Citrat/iron
ratios in plant stem exudates.
Plant Physiol. 41, 515-518, 1966
- 155.) TWYMAN, E.S.: The effect of iron supply on the
yield and composition of leaves of
tomato plants.
Plant and Soil. 10, 375-388, 1958
- 156.) VIELEMEYER, H.P.,
FISCHER, F. u.
BERGMANN, W.: Über den Einfluß des Eisens und Man-
ganernährung auf die Peroxydase-Ka-
talase-Aktivität, sowie den Gehalt
an löslichen Kohlenhydraten in den
Blättern einiger landwirtschaftli-
cher Kulturpflanzen.
Thaer. Arch. 10, Nr. 8 727-745
Landw. Zentralblatt, Teil III, 2605,
1966
- 157.) VLAMIS, J. u.
WILLIAMS, D.E.: Iron and manganese relation in rice
and barley.
Plant and Soil. 20, 221-231, 1964

- 158.) WALKER, G.C. u. NICHOLAS, D.J.D.: An iron requirement for a dissimilatory nitrate reductase in *Neurospora crassa*.
Nature. 189, 141-142, 1961
- 159.) WALLACE, A., MUELLER, R.T., LUNT, D.R., ASHENOFF, R.T. u. SHANNON, L.M.: Comparisons of 5 chelating agents in soils, in nutrients, solutions and plant responses.
Soil Science. 80, 101-108, 1955
- 160.) WALLACE, A. u. LUNT, D.R.: Reactions of iron, zinc and manganese chelates in various soils.
Soil Sci. Soc. Am. Proc. 20, 479-482, 1956
- 161.) WALLACE, A., SHANNON, L.M., LUNT, D.R. u. IMPEY, R.L.: Some aspects of the use of metal chelates as micronutrient fertilizer sources.
Soil Science. 84, 27-41, 1957
- 162.) WALLACE, A. u. HALE, V.Q.: Effect of varying concentration of iron and ethylenediamine di-o-hydroxyphenylacetate on concentration of each in soybeans.
Soil Science. 92, 404-407, 1961
- 163.) WALLACE, A., JEFFNEYS, R.A. u. HALE, A.A.: Differential ability of two soybean varieties to take up ⁵⁹Fe from soil added to a nutrient solution.
Soil Science. 94, 111-114, 1962
- 164.) WALLACE, A.: Role of chelating agents on the availability of nutrients to plants.
Proc. Soil Sci. Soc. Am. 27, Nr. 2 176-179, 1963
- 165.) --" Review of chelating in plant nutrition.
J. Agr. Food Chem. 11, 103-107, 1963
- 166.) --" Chelatbildung und chemische Anlagerung als Erklärung für die Eisenchlorose bei Pflanzen hervorgerufenen Faktoren.
XVIth internat. horticult. congr. Brussels, 1962, hrsg. 1964, 347-351.
Landw. Zentralblatt. Teil II, 2155, 1965

- 167.) WALLIHAN, E.F.,
GARBER, M.J.,
SHARPLESS, R.G. u.
PRINTY, W.: Effect of soil oxygen deficit on
iron nutrition of orange seedlings.
Plant Physiol. 36, 425-428, 1961
- 168.) WATANABE, F.S.,
LINDSAY, W.L. u.
OLSEN, S.R.: Nutrient balance involving phos-
phorus, iron and zinc.
Proc. Soil Sci. Soc. Am. 29,
562-565, 1965
- 169.) WEINSTEIN, L.H.,
PURNIS, E.R.,
MEISS, A.N. u.
UHLER, R.L.: Absorption and translocation of
EDTA by sunflower.
J. Agr. Food Chem. 2, 421-424, 1954
- 170.) WEINSTEIN, L.H.,
ROBBINS, W.R. u.
PERKINS, H.F.: Chelating agents and plant nutri-
tion.
Science. 120, 41-43, 1954
- 171.) WEINSTEIN, L.H. u.
ROBBINS, W.R.: The effect of different iron and
manganese nutrient levels on the
catalase and cytochrome oxydase
activities of green and albino
sunflower leaf tissues.
Plant Physiol. 30, 27, 1955
- 172.) WELKIE, G.W. u.
MILLER, G.W.: Iron nutrition of nicotiana taba-
cum L. in relation to riboflavin-
5-phosphate and flavin-adenine di-
nucleotide content.
Plant Physiol. 35, 516-520, 1960

Meinem sehr verehrten Lehrer, Herrn Professor Dr. H. Linser, möchte ich an dieser Stelle für die Überlassung dieses Themas und für die wissenschaftliche Anleitung herzlichst danken.

Besonderen Dank schulde ich Herrn Professor Dr. H. Kühn, für die mir in jeder Hinsicht zuteil gewordene vielseitige und unvergeßliche Unterstützung und großzügige Förderung.

Herrn Priv. Doz. Dr. W. Höfner und Herrn Dr. K. H. Neumann danke ich für die wertvollen Hinweise und für Ihr freundliches Entgegenkommen.

Mein Dank gilt weiterhin allen Angehörigen des Institutes für Pflanzenernährung für Ihre stete Hilfsbereitschaft.

Lebenslauf

Am 6.4.1941 wurde ich als Sohn des Schulinspektors Abdallah Moawad und seiner Ehefrau Emilie Moawad, geb. Said in Assuan/Ägypten geboren.

Nach 2 Volksschuljahren in Fayoum besuchte ich von 1948 bis 1952 das Vorgymnasium und anschließend das Gymnasium in Minia, an dem ich 1957 die Reifeprüfung ablegte.

Von Okt. 1957 bis Jan. 1962 studierte ich Landwirtschaft an der Ain Schams Universität in Kairo und beendete das Studium mit der Diplomprüfung (B.Sc.).

Zum Erlernen der deutschen Sprache belegte ich einen Kursus an der Justus Liebig Universität in Giessen und beendete ihn im Sommersemester 1963. Anschließend setzte ich das Studium der Landwirtschaft ab Wintersemester 1963 fort. Nachdem ich im Mai 1964 die Ergänzungsprüfung bestand, belegte ich im Wintersemester 1964 ein anorganisch-chemisches Praktikum.

Seit März 1965 war ich mit der Abfassung der vorliegenden Arbeit beschäftigt, um meine Ausbildung auf dem Gebiet der Pflanzenernährung zu vertiefen.

